В. Т. РЕННЕ
Ю. В. БАГАЛЕЙ
И. Д. ФРИДБЕРГ

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ

ДОПУЩЕНО
МИНИСТЕРСТВОМ ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР
В КАЧЕСТВЕ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ
ДЛЯ СТУДЕНТОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ
ФАКУЛЬТЕТОВ ВУЗОВ

ИЗДАТЕЛЬСТВО
«ТЕХНІКА»
КИЕВ
1966

Стр.

Стр.

Изобретение электрического конденсатора относят к середине XVIII в., но начало развития конденсаторостроения следует отнести только к самому концу XIX в., когда после изобретения радио А. С. Поповым возникла большая потребность в конденсаторах. Первое применение конденсаторов было обусловлено развитием радиотехники, а также техники проводной связи, где конденсатор служил основным элементом колебательных контуров и электрических фильтров. Однако в последующее время конденсаторы применяют как важные элементы силовой электротехники, для улучшения коэффициента мощности, для компенсации индуктивности линий электропередач, для пуска однофазных электродвигателей и т. п. Кроме того, в последние годы конденсаторы часто используются в качестве накопителей энергии для всевозможных импульсных устройств как в радиолокационной технике, так и в устройствах для изучения термоядерных реакций, для использования электрогидравлического эффекта и т. п.

В связи с таким широким применением конденсаторов в современной технике потребность в них непрерывно растет и годовой выпуск в мировом масштабе исчисляется уже миллиардами штук для мелких радиоконденсаторов и миллионами киловатт реактивной мощности для крупных силовых конденсаторов.

В СССР за последние годы возникла новая отрасль производства — конденсаторостроение. Это вызывает потребность в специализированной литературе, в частности в руководстве по расчету и конструированию конденсаторов.

В основу подготовки рукописи был положен опыт преподавания курсов «Теория, технология и конструкция конденсаторов» (ЛПИ им. Калинина) и «Расчет и конструирование изоляции» (ХПИ им. В. И. Ленина). К разработке

отдельных разделов книги были также привлечены специалисты конденсаторного производства.

При составлении пособия была использована отечественная и зарубежная литература по расчету и конструированию конденсаторов.

Параграфы 1, 2, 3, 4 и 11 написаны совместно В. Т. Ренне и Ю. В. Багалеем, параграфы 5, 6, 8, 9, 12, 13, 14, 16, 20 и 21 — В. Т. Ренне, параграфы 7, 15, 17, 18 — Ю. В. Багалеем, а параграф 10 написал И. Д. Фридберг.

Книга, целиком посвященная вопросам расчета и конструирования конденсаторов, издается впервые как в отечественной, так и в зарубежной практике.

Авторы выражают благодарность канд. техн. наук В. М. Файницкому и доценту М. И. Мантрову за ценные замечания, высказанные при рецензировании рукописи, а также инженерам В. И. Карабанову, принявшему участие в написании параграфа 14, и В. П. Буц, разработавшему методику расчета вакуумных конденсаторов.

Критические замечания по содержанию книги просим направлять по адресу: *Киев, 4, Пушкинская, 28, издательство «Техніка»*.

ГЛАВА 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАСЧЕТЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ

§ 1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА И РАСЧЕТНОЕ ЗАДАНИЕ

Расчет конденсатора сводится к нахождению оптимальных размеров, обеспечивающих получение заданных значений электрических характеристик конденсатора, и надежности работы при наименьших затратах на его производство. В частных случаях, если конденсатор применяется в особо ответственной аппаратуре, его стоимость может иметь второстепенное значение, и главное внимание приходится уделять получению наивысших возможных характеристик или наименьшего объема и веса.

Обычно при расчете заранее известен тип диэлектрика, используемого в рассчитываемом конденсаторе. В этом случае для выполнения расчета должны быть заданы три основных параметра: номинальная емкость конденсатора $C_н$; номинальное рабочее напряжение $U_р$; рабочая частота $f_р$.

Для мощных конденсаторов переменного тока вместо емкости может быть указана реактивная мощность

$$P_р = U_р^2 \omega C_н = 2\pi U_р^2 f_р C_н. \qquad (1\text{-}1)$$

Зная значение реактивной мощности, напряжения и частоты, из этой формулы находим выражение для вычисления емкости

$$C_н = \frac{P_р}{2\pi U_р f_р}. \qquad (1\text{-}2)$$

Если в расчетном задании предполагается, что конденсатор предназначен для работы при постоянном напряже-

нии ($f = 0$), то под постоянным иногда понимают выпрямленное напряжение. В этом случае в кривой напряжения будут две составляющие: постоянная и переменная. Переменная составляющая может вызывать заметный нагрев конденсатора, а также влиять на его ионизационные характеристики. Кратковременная электрическая прочность конденсатора будет определяться суммой постоянной и амплитудной переменной составляющих. Поэтому в расчетном задании должны быть оговорены частота и амплитуда переменной составляющей пульсирующего (выпрямленного) напряжения.

При работе конденсатора в цепях переменного тока, где возможно наличие высших гармоник, следует указать частоту и амплитудное значение тех высших гармоник, которые наиболее резко выражены в кривой напряжения. Наличие высших гармоник опасно потому, что вследствие увеличения потерь при заметном отклонении кривой напряжения от синусоиды может возникнуть дополнительный разогрев конденсатора.

Если конденсатор используется при импульсном напряжении, то необходимо оговорить форму импульсов и частоту их следования. При этом важно указать, изменяется ли полярность импульсов.

Обычно для конденсаторов с заданным типом диэлектрика характерно определенное соотношение между рабочим $U_р$ и испытательным $U_{исп}$ напряжениями. Если в условиях работы конденсатор будет подвергаться кратковременному воздействию больших перенапряжений, для чего может потребоваться увеличение отношения $\frac{U_{исп}}{U_р}$ по сравнению с обычным значением, то это также надо оговорить в расчетном задании.

Кроме величины $U_р$, в расчетном задании должна быть указана продолжительность воздействия напряжения на конденсатор, т. е. срок службы конденсатора, поскольку в различных условиях применения конденсаторов эта величина может колебаться от сотен тысяч часов до нескольких часов и даже меньше. Для импульсных конденсаторов вместо срока службы может быть указано максимальное суммарное количество импульсов, которое может воздействовать на конденсатор за все время его работы. Если к конденсатору предъявляется требование об определенной надежности его работы, то в расчетном задании обычно ука-

зывается максимально допустимое значение интенсивности отказов λ в $\frac{1}{\text{час}}$.

Под интенсивностью отказов понимают относительное количество конденсаторов, выходящих из строя в единицу времени (в один час) при испытании на длительную работу под номинальным напряжением при верхнем пределе допускаемой рабочей температуры,

$$\lambda = \frac{2n}{(N_1 + N_2)\tau}, \tag{1-3}$$

где τ — длительность испытания;

$n = N_1 - N_2$ — число конденсаторов, вышедших из строя за это время;

N_1 — общее число конденсаторов в испытуемой партии в начале испытания;

N_2 — оставшееся работоспособным количество конденсаторов в этой же партии в конце испытания, т. е. по истечении времени τ.

Иногда величину λ определяют и при других значениях напряжения и температуры, причем надо иметь в виду, что при увеличении приложенного к конденсатору напряжения и температуры окружающей среды λ возрастает, т. е. ухудшается надежность конденсатора. Иногда величину λ определяют не только при старении под напряжением, но и в условиях хранения конденсаторов. В этом случае выход конденсатора из строя характеризуется не пробоем, а потерей герметичности, выходом параметров за пределы допускаемых норм и т. п.

При расчете конденсатора величину λ вычислить нельзя, но ее приходится принимать во внимание при выборе запаса электрической прочности (увеличивая его, если задана повышенная надежность, т. е. пониженное значение λ), при выборе системы герметизации и т. д.

Для проведения теплового расчета конденсатора необходимо, чтобы в расчетном задании был указан верхний предел рабочей температуры окружающей среды $t_{\text{о. макс}}$, при котором будет использоваться конденсатор. Эта величина имеет также значение при выборе конструктивного оформления конденсатора, в частности системы его герметизации. Для правильного выбора внешнего конструктивного оформления необходимо указать также условия влажности окружающей среды и давления воздуха. Влажность (комнатная,

повышенная в условиях хранения или работы в неотапливаемых помещениях, высокая в условиях работы на открытом воздухе, тропическая в условиях работы при одновременном воздействии высокой влажности и повышенной температуры) имеет решающее значение при выборе системы герметизации. Давление воздуха в окружающей среде влияет на разрядные напряжения изоляции выводов конденсатора, а потому должно быть учтено при расчете изоляторов.

Представляет интерес также и нижний предел температуры окружающей среды $t_{о.\ мин}$, особенно при использовании жидких диэлектриков в конструкции конденсатора для целей пропитки или заливки. В этом случае при расчете приходится учитывать изменение объема жидкости, залитой в конденсатор, при колебаниях температуры во всем возможном диапазоне ее изменения.

Если известен тип диэлектрика, то в большинстве случаев этим определяется и тип конструкции основы конденсатора — конденсаторной секции: плоская, цилиндрическая или спиральная (намотанная). Иногда при одном и том же диэлектрике можно применить несколько конструкций: при отсутствии специальных соображений по выбору варианта конструкции необходимо рассчитать несколько вариантов и выбрать оптимальный.

Если в расчетном задании не указан тип диэлектрика, то расчет надо начинать с его выбора. Эта задача облегчается тем, что сочетание заданных значений $C_н$, $U_р$ и $f_р$ уже предопределяет использование лишь нескольких диэлектриков из тех, которыми располагает современное конденсаторостроение.

Для облегчения правильного выбора типа диэлектрика в расчетном задании желательно иметь следующие дополнительные сведения о характеристиках конденсатора: точность значения емкости (допустимое отклонение емкости от номинального значения $\Delta C_н$); температурный коэффициент емкости ТКЕ или допустимые изменения емкости, по сравнению с ее значением при 20° С, при крайних значениях рабочей температуры $t_{о.\ мин}$ и $t_{о.\ макс}$ (если не требуется линейность изменения емкости при изменениях температуры); максимально допустимое значение тангенса угла потерь $\operatorname{tg} \delta$; минимально допустимое значение сопротивления изоляции конденсатора $(R_{из})_{мин}$ или минимальная постоянная времени $(R_{из}C)_{мин}$.

Учитывая совокупность этих требований, можно выбрать один определенный диэлектрик. Если можно выбрать два или более различных диэлектрика, то необходимо рассчитать каждый из них, а затем уже выбрать оптимальный вариант.

Основным при расчете конденсатора является правильный выбор толщины диэлектрика d, так как от нее зависят как размеры конденсатора, так и надежность его работы. По существу каждый раз приходится идти на компромисс между двумя противоположными требованиями: обеспечить повышенную надежность, для чего требуется увеличивать d, или обеспечить наименьшие значения веса, объема и стоимости конденсатора, для чего требуется уменьшать d.

Как будет показано ниже, в первом приближении объем конденсатора изменяется пропорционально квадрату толщины диэлектрика, поэтому снижение толщины d является существенным способом удешевления конденсатора и снижения его габаритных размеров.

Для конденсаторов постоянного тока и низкой частоты величина d обычно устанавливается на основе расчета электрической прочности конденсатора; для ряда типов высокочастотных конденсаторов величина d находится из теплового расчета и потом только проверяется в отношении запаса электрической прочности.

С применением полупроводниковых приборов в электронной технике резко снизились предельные значения $U_р$ для многих типов конденсаторов. В связи с этим при расчете конденсаторов низкого напряжения можно не рассчитывать величину d, а просто выбрать, из технологических соображений, наименьшее ее значение для данного диэлектрика. Обычно для таких материалов, как бумага, синтетические пленки, слюда, приходится ориентироваться на минимальные значения толщины, оговоренные в соответствующих ГОСТ или ТУ.

В настоящее время для получения слоев диэлектриков очень малой толщины отрабатываются новые технологические приемы (испарение в вакууме, катодное распыление, термическое и химическое окисление, пиролитическое разложение, полимеризация в газовом разряде, нанесение тонких слоев и т. п.). В этом случае даже при малых напряжениях толщину диэлектрика d следует выбирать с учетом электрической прочности.

После определения величины d необходимо выбрать конструкцию конденсаторной секции — основы конденсатора, что обычно определяется заданным или выбранным типом диэлектрика, а также номинальными параметрами конденсатора, указанными в расчетном задании. В соответствии с конструкцией выбирается расчетная формула, связывающая емкость с толщиной диэлектрика и основными размерами обкладок. Используя выбранную формулу емкости, заданное значение $C_н$ и найденное значение d, а также выбирая из конструктивных соображений соотношение ширины и длины обкладок, в случае плоского или спирального конденсатора, и задаваясь длиной обкладки или диаметром цилиндрического конденсатора, можно найти размеры активной части диэлектрика. Для установления размеров конденсаторной секции приходится дополнительно выбирать размеры закраин (расстояние от края обкладки до края диэлектрика), исходя из расчета на отсутствие перекрытия или основываясь на технологических соображениях, и толщину обкладок из соображений механической прочности, т. е. из технологических соображений или на основе расчета величины потерь в обкладках (для конденсаторов повышенной или высокой частоты).

После установления размеров конденсаторной секции (в некоторых случаях, размеров пакета секций, если применяется их последовательное, параллельное или смешанное соединение) устанавливаются размеры конденсатора на основе выбора внешнего конструктивного оформления, а также расчета изоляции от корпуса, если он металлический. При этом, если толщина диэлектрика была выбрана только на основе расчета электрической прочности, то после определения внешних размеров следует провести тепловой расчет конденсатора в случае его предназначения для работы при переменном или импульсном напряжении (при повышенной частоте повторения импульсов), а также при постоянном напряжении, если верхний предел рабочей температуры велик (порядка 100° и выше) *.

Потери обычно определяются при разработке новых типов конденсаторов, когда для теплового расчета нельзя воспользоваться практическими данными по измерению угла потерь у аналогичных конденсаторов, которые уже выпус-

* В системе СИ температура измеряется по шкале Кельвина $T_К = t + 273{,}15$, где $T_К$ — температура в °К; t — температура в °С.

кались производством. Индуктивность рассчитывается в тех случаях, когда от конденсатора требуется минимальное значение этого параметра (шунтирование токов высокой частоты, накопление энергии с последующим кратковременным разрядом и т. п.).

§ 2. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ КОНДЕНСАТОРОВ

Конденсатор необходимо рассчитать так, чтобы его электрическая прочность обеспечивалась как при воздействии на него испытательного напряжения или кратковременных перенапряжений (кратковременная прочность), так и при длительном воздействии номинального рабочего напряжения (длительная прочность). Как в первом, так и во втором случае не должно быть пробоя через толщу диэлектрика или по закраинам (поверхностный пробой). При этом надо учитывать не только активный (основной) диэлектрик, разделяющий обкладки конденсатора, но также изоляцию между секциями и от корпуса (при использовании металлического кожуха или металлических обжимных пластин) и внешнюю изоляцию выводов конденсатора (выводные изоляторы, изоляция выводных проводников и т. д.).

Основное внимание при расчетах уделяется активному диэлектрику, толщина которого определяет удельную емкость конденсатора, а потому должна быть возможно малой. Для изоляции от корпуса или изоляции выводов можно принимать значительно бо́льшие толщины. Площадь электродов, по которым подводится напряжение к активному диэлектрику, обычно много больше, чем для изоляции от корпуса и для изоляции выводов; в связи с этим возрастает опасность пробоя через активный диэлектрик.

Расчет электрической прочности сводится к нахождению допускаемых значений напряженности: $E_{исп}$ — при кратковременном и $E_р$ — при длительном воздействии напряжения. Затем определяются два значения толщины диэлектрика:

$$d_1 = \frac{U_{исп}}{E_{исп}} \text{ и } d_2 = \frac{U_р}{E_р} \tag{1-4}$$

и выбирается наибольшее. Обычно расчет ведут на длительную работу конденсатора, т. е. определяют $E_р$, по нему находят значение толщины, а затем определяют величину $E_{исп}$, соответствующую данной толщине и заданному испытательному напряжению, и проверяют, обеспечит ли это

значение $E_{исп}$ при кратковременном пробое нужную величину запаса электрической прочности

$$k = \frac{U_{пр}}{U_{исп}} = \frac{E_{пр}}{E_{исп}}, \qquad (1\text{-}5)$$

где k — коэффициент запаса.

Обычно принятое в производстве соотношение $\frac{U_{исп}}{U_{р}}$ гарантирует необходимый запас электрической прочности при испытательном напряжении, если правильно выбрано допускаемое значение напряженности $E_{р}$.

Однако в условиях эксплуатации конденсатор иногда подвергается воздействию больших перенапряжений, вследствие чего может потребоваться увеличение $U_{исп}$ по сравнению с обычным значением. В этом случае может оказаться, что по условиям кратковременной электрической прочности толщину диэлектрика придется взять большей, чем это требуется для обеспечения длительной электрической прочности. Поэтому конденсаторы рассчитывают на электрическую прочность как при кратковременном, так и при длительном действии напряжения.

Расчет электрической прочности при кратковременном действии напряжения

Расчет ведется, исходя из заданного значения испытательного напряжения $U_{исп}$, которое кратковременно должен выдержать конденсатор при испытании в течение небольшого промежутка времени, обычно порядка нескольких секунд, реже — 1 *мин*. Время испытания оговаривается в техническом задании или же определяется действующими ГОСТ или ТУ, если рассчитывается конденсатор, уже выпускаемый производством. Величина $U_{исп}$ устанавливается с учетом тех кратковременных перенапряжений, которые могут воздействовать на конденсатор в реальных условиях применения.

Величина допускаемого значения напряженности электрического поля в диэлектрике конденсатора при его испытании выбирается с известным запасом по отношению к кратковременной пробивной напряженности $E_{пр.\,кр}$. При выборе коэффициента запаса k необходимо учитывать зависимость $E_{пр.\,кр}$ от многих факторов, в частности от времени выдержки даже в области малых значений времени (секунда — мину-

та). Поэтому желательно, чтобы принятые для расчета $E_{исп}$ значения $E_{пр}$ были получены при таких значениях времени, или возможно близких к ним, которые предусмотрены для испытания конденсатора кратковременным воздействием напряжения.

Сведения об электрической прочности выбранного диэлектрика могут быть двоякого характера: средние значения $E_{пр}$ или полные данные об испытании образцов, позволяющие оценить отклонения $E_{пр}$ отдельных образцов от среднего значения.

Если имеется только среднее значение, полученное при испытании некоторого количества однотипных образцов, причем количество этих образцов и неизбежный разброс данных от среднего значения неизвестен, то значение $E_{исп}$ должно быть установлено с известным запасом по отношению к среднему значению

$$E_{исп} \leqslant \frac{E_{пр}}{k_1}. \qquad (1\text{-}6)$$

Ориентировочно k_1 надо взять не менее 2, рассчитывая на разброс порядка $\pm 50\%$ для диэлектрика небольших толщин и небольшой площади электродов. Если площадь электродов увеличенная, а толщина диэлектрика повышенная, то разброс может достигать значений $\pm(25 \div 30)\%$, однако для надежности можно сохранять значение $k_1 = 2$.

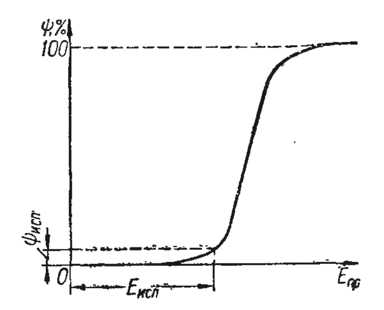


Рис. 1. Кривая разброса электрической прочности.

Если $E_{пр}$ находится непосредственно из опыта, то наряду со средним значением можно располагать полными результатами опыта (рис. 1), выраженными кривой зависимости интегральной вероятности пробоя (суммарное относительное количество образцов по отношению ко всей партии, которое пробивается при заданном значении $E_{пр}$ или при любом меньшем).

При испытании достаточно большого количества образцов можно найти по кривой значение $E_{исп}$, при котором вероятность пробоя не будет превышать некоторого опреде-

ленного минимального значения ψ, например 1 или 0,1% и т. п. При этом пользоваться средним значением $E_{пр}$ и вводить коэффициент запаса k_1 для учета разброса от средних значений уже не требуется.

Однако необходимо учесть, что величина $E_{пр}$ при кратковременном испытании существенно зависит от толщины диэлектрика и от площади электродов. Технология изготовления образцов, на которых производится определение $E_{пр}$, должна быть возможно ближе к технологии изготовления рассчитываемого конденсатора.

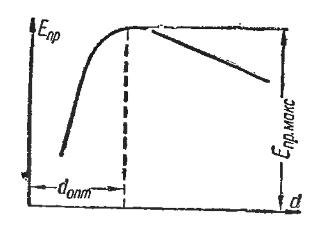


Рис. 2. Кривая зависимости средней пробивной напряженности от толщины диэлектрика при кратковременном воздействии напряжения.

Предположим, что имеется неравномерное электрическое поле, характерное для конденсаторов плоского или намотанного типа, а также для обычных трубчатых конденсаторов, причем характер картины поля у испытуемых образцов, используемых для нахождения $E_{пр}$, такой же, как и для рассчитываемого конденсатора. В этом случае кривая зависимости кратковременной электрической прочности от толщины диэлектрика в общем виде показана на рис. 2. В области небольших толщин наблюдается снижение $E_{пр}$ с уменьшением толщины за счет усиливающегося влияния слабых мест в диэлектрике; в области больших толщин $E_{пр}$ снижается с ростом толщины за счет влияния краевого эффекта (в этой области пробой происходит преимущественно только у краев обкладки). Значения $E_{пр}$, по которым выбирается $E_{исп}$, должны быть получены при той же толщине, которая будет использована в рассчитываемом конденсаторе. Практически желательно иметь кривую $E_{пр} = f(d)$ для выбранного типа диэлектрика в том интервале толщин, которые могут быть использованы в конденсаторостроении.

По кривой из рис. 2 видно, что при некотором значении толщины $d_{опт}$ значение $E_{пр}$ достигает максимума $E_{пр.\,макс}$. Такой же характер кривой будет получен, если применить слоистый диэлектрик (бумажный, пленочный и другие конденсаторы), а по оси абсцисс отложить число слоев тонкого диэлектрика, разделяющих обкладки. При этом максимальное значение $E_{пр}$ будет соответствовать некоторому оптимальному числу слоев $n_{опт}$. Необходимо иметь в виду, что

это оптимальное значение может несколько изменяться при изменении толщины отдельного слоя. В дальнейшем будем пользоваться значением $d_{опт}$, полагая, что в случае слоистого диэлектрика

$$d_{опт} = n_{опт} d_1, \qquad (1\text{-}7)$$

где d_1 — толщина единичного слоя.

Максимальному значению $E_{пр}$ при толщине $d_{опт}$ соответствует и максимально возможное значение $E_{исп}$, т. е. используется наилучшим образом диэлектрик в отношении кратковременной электрической прочности. В связи с этим при расчете конденсаторов с высоким испытательным напряжением выгодно разбивать их на N последовательно соединяемых секций, выбирая толщину диэлектрика в каждой секции равной оптимальной или близкую к ней. В этом случае выбирается $E_{исп. макс}$ в соответствии с $E_{пр. макс}$ и находится испытательное напряжение отдельной секции

$$U_{исп. секц} = \frac{E_{пр. макс}}{k_1} d_{опт} = E_{исп. макс}\, d_{опт}. \qquad (1\text{-}8)$$

Затем по заданному значению испытательного напряжения конденсатора в целом $U_{исп}$ находится число секций, включаемых последовательно,

$$N = \frac{U_{исп}}{U_{исп. секц}}. \qquad (1\text{-}9)$$

Надо иметь в виду, что в данном случае емкость каждой секции будет в N раз больше номинальной емкости конденсатора:

$$C_с = NC_и. \qquad (1\text{-}10)$$

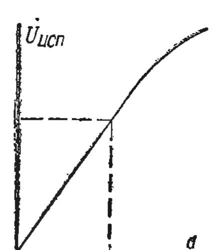


Рис. 3. Кривая зависимости испытательного напряжения от толщины диэлектрика.

Для конденсаторов с небольшим напряжением толщина диэлектрика выбирается меньше $d_{опт}$, поэтому материал используется менее выгодно. Для таких толщин удобнее вместо кривой $E_{пр} = f(d)$ иметь кривую $U_{пр} = f(d)$, по которой построить кривую допустимых значений $U_{исп} = f(d)$ (рис. 3). Пользуясь этой кривой, по заданному значению $U_{исп}$ можно сразу найти необходимую толщину диэлектрика d.

Кривые, показанные на рис. 2 и 3, обычно строятся по результатам испытания образцов конденсаторов небольшой

емкости с небольшой площадью обкладок (электродов). При расчете конденсатора относительно большой емкости необходимо учесть, что с увеличением площади электродов электрическая прочность диэлектрика снижается, так как увеличивается вероятность попадания под электроды слабых мест с особо сниженной прочностью.

При относительно больших толщинах диэлектрика, когда распределение значений $E_{пр}$ (дифференциальная вероятность) имеет вид симметричной кривой (рис. 4), подчиняющейся закону Гаусса, для пересчета можно воспользоваться обычными методами математической статистики.

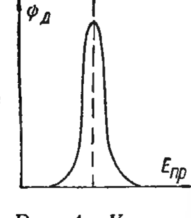


Рис. 4. Кривая зависимости дифференциальной вероятности пробоя от напряженности поля (при соблюдении закона Гаусса).

При малых толщинах диэлектрика распределение значений $E_{пр}$ может резко отличаться от нормального распределения, поэтому обычный статистический метод применить нельзя. Для этого случая А. С. Зингерман предложил метод пересчета, использующий в качестве основы для вычисления среднего значения $E_{пр}$, соответствующего большой площади электродов, экспериментально найденную форму кривой распределения при малой площади электродов. Этот метод неудобен тем, что если отношение большой площади к малой велико (порядка 100), то для получения достаточной точности расчета необходимо иметь очень большое число образцов малой площади для построения исходной кривой распределения (порядка 1000 при $\frac{S_1}{S_2} = 100$).

При небольших толщинах диэлектрика (например, двух-трех слоях конденсаторной бумаги) зависимость среднего значения $E_{пр}$ от логарифма емкости конденсатора (от логарифма площади обкладок) выражается падающей прямой линией, что соответствует эмпирическому уравнению

$$E_{пр} = a - b \lg C, \qquad (1\text{-}11)$$

или

$$E_{пр} = a' - b \lg S, \qquad (1\text{-}12)$$

где C — емкость;
S — площадь обкладок;
a (или a') и b — постоянные коэффициенты для данного типа конденсатора с заданным диэлектриком определенной толщины.

В данных формулах коэффициенты a и a' представляют собой значения кратковременной прочности при единичных значениях емкости или площади обкладок и в значительной мере зависят от толщины диэлектрика. Коэффициент b, определяющий наклон прямой к оси абсцисс, также зависит от толщины диэлектрика, хотя и в меньшей степени.

Поскольку значения $E_{пр}$ резко зависят от площади обкладок, т. е. от емкости конденсатора при больших значениях $C_н$, целесообразно разбивать конденсатор на ряд параллельно соединяемых секций меньшей емкости и отбраковывать при испытании дефектные секции. При равных емкостях секций величина емкости секции

$$C_с = \frac{C_н}{M}, \tag{1-13}$$

где M — число параллельно соединяемых секций.

Среднее значение $E_{пр}$ для каждой секции будет выше, чем для несекционированного конденсатора, и брак при испытании на пробой резко уменьшится. В этом случае в конструкции конденсатора полезно предусмотреть индивидуальную защиту секций плавкими предохранителями, тогда случайный пробой одной из наиболее слабых секций при воздействии кратковременного перенапряжения не выведет конденсатор из строя, так как пробитая секция автоматически отключится плавким предохранителем.

Для конденсаторов высокого напряжения целесообразно разбивать конденсатор на ряд секций, соединяемых последовательно. При числе последовательных секций, равном N, емкость секции будет в N раз больше номинальной емкости конденсатора в целом. Поэтому иногда целесообразнее разбить такую секцию на параллельно соединяемые более мелкие секции. В этом случае конденсатор будет состоять из N последовательно соединенных групп секций по M параллельно соединенных секций в каждой группе. Емкость отдельной секции в таком конденсаторе

$$C_с = \frac{N}{M} C_н, \tag{1-14}$$

где $C_н$ — номинальная емкость конденсатора в целом.

Применение в конденсаторах относительно небольших секций, соединяемых параллельно, связано не только с повышением $E_{пр}$ при уменьшении емкости (площади обкладок), но также и с соображениями технологического порядка:

секции очень больших размеров могут создавать неудобства на многих технологических операциях. Кроме того, по технико-экономическим соображениям рационально комплектовать конденсаторы с различными номинальными данными из соединяемых параллельно или последовательно стандартных секций.

Выше рассматривались конденсаторы, у которых диэлектрик находится в заведомо неоднородном поле у края обкладки. В некоторых случаях можно изменить толщину диэлектрика у краев обкладок, выравнять электрическое поле в этих местах и обеспечить равномерность поля не только под обкладками, но и у их краев. Практически это возможно при изготовлении керамических конденсаторов высокого напряжения.

Расчет закраин конденсатора

Пробой конденсатора при кратковременном воздействии напряжения (во время испытания или при воздействии кратковременных перенапряжений) может произойти не только через толщу активного диэлектрика, но и по закраине, отделяющей край обкладки от края пластины, ленты или трубки, используемых в качестве диэлектрика.

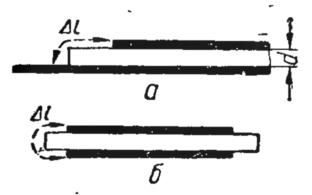


Рис. 5. Закраины конденсатора при расположении обкладок:
а — несимметричном; *б* — симметричном.

В секции конденсатора различают закраины двух вариантов:

а) при несимметричном расположении обкладок, когда край одной обкладки сдвинут относительно другой, или когда за край одной обкладки выступает вывод от другой обкладки (рис. 5,*а*);

б) при симметричном расположении обкладок, когда края их совпадают (рис. 5,*б*).

В обоих случаях путь перекрытия Δl измеряется как расстояние по поверхности диэлектрика между краями обкладок. В этот размер входит толщина диэлектрика d.

Для большинства конструкций конденсаторов $d \ll \Delta l$, поэтому при определении величины Δ размер d можно исключить. Длина закраины Δl выбирается с таким расчетом, чтобы напряжение разряда по закраине было выше

испытательного напряжения $U_{исп}$, установленного для данного типа конденсаторов. Это необходимо для исключения поверхностного разряда (перекрытия по закраине) в момент испытания конденсатора. При резко неоднородном поле (рис. 5) перекрытию по закраине при напряжении $U_{пк}$ предшествует появление скользящих разрядов при напряжении $U_{ск} < U_{пк}$; при еще меньшем, коронном напряжении $U_{к}$, скользящим разрядам предшествует появление короны у краев обкладки.

Скользящие разряды, даже кратковременно действующие на поверхности диэлектрика, могут вызвать частичное разрушение поверхности и опасны не только для органических, но и для неорганических диэлектриков. Поэтому желательно, чтобы $U_{исп} < U_{ск}$. Неорганические диэлектрики обычно имеют высокую короностойкость, а потому появление короны у края обкладок в момент испытания конденсатора кратковременным воздействием напряжения может не вызвать вредных последствий. Для органических диэлектриков не следует допускать даже кратковременной короны у краев обкладок, т. е. принимать $U_{исп} < U_{к}$.

Для правильного определения величины закраин необходима полученная из эксперимента зависимость между Δl и напряжениями $U_{пк}$, $U_{ск}$ и $U_{к}$ применительно к выбранному типу диэлектрика. Сначала величина напряжения перекрытия (скользящих разрядов, короны) возрастает практически линейно с ростом закраины, но в области высоких напряжений линейность нарушается. В этой области даже значительное увеличение закраины уже не дает заметного возрастания напряжения перекрытия ($U_{ск}$ или $U_{к}$). Практически получается, что для некоторого достаточно высокого напряжения изготовить конденсатор вообще нельзя, так как размер закраин в нем окажется недопустимо велик.

Однако с точки зрения наилучшего использования диэлектрика конденсаторы высокого напряжения разделяют на ряд последовательно соединяемых секций с оптимальной толщиной диэлектрика в каждой секции. При этом напряжение, приходящееся на каждую секцию, снижается до величины, находящейся в пределах прямолинейного участка кривой $\Delta l = f(U_{пк})$. В соответствии с этим для каждого типа конденсатора можно построить прямолинейную зависимость между $U_{исп}$ и Δl, где $U_{исп}$ выбирается с определенным запасом по отношению к величине $U_{пк}$ (чаще по отношению к $U_{ск}$ или $U_{к}$). Этот запас учитывает разброс от сред-

них значений, который обычно составляет около $\pm(20 \div 25)\%$. Если иметь кривую разброса значений и ориентироваться на минимальные значения $U_{пк}$, $U_{ск}$ или $U_{к}$, то можно обойтись без использования коэффициента запаса при условии, что по количеству точек на кривой можно установить с достаточной точностью ту минимальную вероятность перекрытия или появления скользящих разрядов (или короны), которая гарантируется.

Прямолинейную зависимость можно выразить уравнением

$$\Delta l = k_з U_{исп}, \tag{1-15}$$

где Δl — в *мм*, $U_{исп}$ — в *в*;

$k_з$ — коэффициент закраины, *мм/в*.

Зная коэффициент закраины, можно определить величину Δl по заданному значению $U_{исп}$. При этом необходимо иметь в виду, что величина $k_з$ зависит от толщины диэлектрика (при заданном значении Δl величина $U_{пк}$, а следовательно, и величина $U_{исп}$ должны возрастать, а коэффициент $k_з$ соответственно снижаться примерно пропорционально $\sqrt{d}$); на величину $k_з$ оказывает влияние также частота, давление окружающей среды и ряд других факторов.

При небольших значениях $U_{исп}$, когда расчет по формуле (1-15) дает малые, порядка нескольких миллиметров, значения Δl, размер закраины выбирается из технологических соображений. В этом случае размер закраины должен быть больше возможного при намотке секции сдвига обкладок, чтобы обеспечивалось отсутствие короткого замыкания между обкладками.

Расчет электрической прочности при длительном воздействии напряжения

При длительном действии напряжения в диэлектрике конденсаторов происходит процесс старения, постепенно ухудшающий электрическую прочность. Это необходимо учитывать, выбирая значение напряженности поля $E_р$, допускаемой при длительной работе конденсатора.

Ранее считалось, что процесс старения характерен лишь для диэлектриков органического происхождения (бумага, синтетическая пленка и т. п.). В последние годы установлено, что старение при длительном воздействии напряжения, особенно в условиях повышенной температуры, происходит

и в неорганических диэлектриках (слюда, многие виды керамики, стекло и т. п.), хотя механизм старения имеет другой характер.

При переменном напряжении как технической, так и радиочастоты, а также при многих импульсных режимах (в частности, радиолокационных) основной причиной старения диэлектрика в конденсаторах является ионизация (корона), возникающая внутри диэлектрика или у краев обкладок, преимущественно в остаточных газовых включениях. Ионизация может также развиваться и во вновь возникающих включениях газов, которые образуются при локальных пробоях пропиточной или заливочной жидкости или появляются в результате электролиза остаточной влажности (при низкой частоте).

Ионизация разрушает органические диэлектрики в результате непосредственной их бомбардировки свободными ионами или электронами (возникающими в результате этого процесса) или за счет агрессивного действия на диэлектрик озона и окислов азота, образующихся при разрушении разрядами остаточного воздуха и являющихся сильными окислителями. Выделение тепла в месте развития ионизации также может разрушать недостаточно нагревостойкие органические диэлектрики.

Неорганические диэлектрики обладают повышенной химической стойкостью и нагревостойкостью. Поэтому развитие ионизации в конденсаторах с такого рода диэлектриками, в частности у краев обкладок, прежде всего опасно не для основного диэлектрика, а для органических материалов, используемых в конструкции (пластмасса, применяемая для опрессовки, облицовочный компаунд, заливочные твердые или жидкие материалы и т. п.). Однако нагрев в местах ионизации иногда опасен и для неорганического диэлектрика, так как локальное повышение температуры может вызвать местную тепловую нестабильность, переходящую в тепловой пробой (стекло, слюда). Для керамических материалов была установлена особая форма пробоя — термоионизационно-механического: ионизация в закрытой поре вызывает сильный местный разогрев, в результате которого появляются механические напряжения, сопровождающиеся растрескиванием керамики и пробоем по трещине.

С течением времени $E_{пр}$ снижается до некоторого определенного значения, соответствующего напряженности поля $E_и$, при которой возникает ионизация. Если выбрать

значение $E_р < E_и$, то явления ионизации, а следовательно, старения не будет, и срок службы конденсатора должен быть неопределенно велик.

При обычном неоднородном поле, характерном для большинства типов конденсаторов, $E_и$ существенно снижается с толщиной диэлектрика. В связи с этим для более выгодного использования диэлектрика конденсатора целесообразно разбивать последний на ряд последовательно соединяемых секций с минимально возможной толщиной диэлектрика в каждой секции. Однако чрезмерное снижение толщины диэлектрика, при переходе за некоторое оптимальное ее значение, приводит к резкому снижению кратковременной прочности (см. рис. 2). Поэтому при выборе толщины диэлектрика для последовательно соединяемых секций в конденсаторах переменного напряжения выбирают толщину диэлектрика несколько ниже $d_{опт}$, чтобы получить повышенное значение $E_и$ при достаточно высоком кратковременном значении $E_{пр}$.

Значения $E_и$ зависят не только от толщины, но также и от других факторов, в частности от частоты, от типа пропитывающей или заливочной жидкости и т. п. При отсутствии заливки жидкостью, когда ионизация развивается в воздухе у края обкладки или во внутренних замкнутых порах, заполненных воздухом или другим газом, $E_и$ имеет стабильное значение. В этом случае коэффициент запаса k_2, который надо брать при выборе $E_р$ по отношению к $E_и$, должен учитывать только разброс от средних значений, получаемый при экспериментальном определении $E_и$. Этот разброс обычно невелик и составляет $\pm$ (25 $\div$ 30)%. При заливке жидкостью резко повышается $E_и$ (так же, как и при пропитке пористых диэлектриков с открытыми порами, например, бумаги), но при этом величина $E_и$ становится нестабильной. Под воздействием поля, превышающего $E_и$, в конденсаторе с диэлектриком такого типа, даже при относительно кратковременном воздействии, происходит пробой жидкости, связанный с выделением газа. Образование газового включения приводит к заметному снижению $E_и$. Если перенапряжение поддерживается достаточно длительно, то величина $E_и$ может снизиться до значения, которое она имела бы при отсутствии пропитки или заливки жидкостью. Степень снижения зависит от типа пропитывающей жидкости и ее склонности к газовыделению при воздействии поля (газостойкости).

В этом случае запас при выборе $E_р$ обусловливается тем, что напряженность поля, которая может возникать в конденсаторе при действии перенапряжений в процессе эксплуатации (а также при кратковременных испытаниях), должна быть ниже значения $E_и$. Таким образом, если возможная кратность перенапряжений составляет $k_п$, а запас, учитывающий разброс значений $E_и$, — k_2, то должно соблюдаться соотношение

$$E_р \leqslant \frac{E_и}{k_2 k_п}. \quad (1\text{-}16)$$

При пропитке или заливке конденсатора с твердым диэлектриком электроизоляционной жидкостью с использованием высокого вакуума значения $E_и$ могут оказаться достаточно высокими для того, чтобы выбранные по ним значения $E_р$ оказались завышенными с точки зрения тепловой устойчивости конденсатора. Поэтому расчет, основанный на учете выбора $E_р$ по соображениям об отсутствии ионизации, должен быть дополнен тепловым расчетом для проверки отсутствия опасного перегрева при выбранном значении $E_р$.

Тепловой расчет особо важен при использовании конденсаторов в цепях переменного тока средних частот (1—10 *кгц*), например, в электротермических установках.

В области частот порядка 0,1—1 *Мгц* и выше, т. е. в области радиочастот, толщина диэлектрика выбирается по данным теплового расчета, так как значения $E_р$, соответствующие тепловому равновесию конденсатора, обычно ниже, чем значения $E_р$, которые можно допустить из расчета на отсутствие ионизации. При использовании форсированного охлаждения, например, водяного, даже при радиочастотах иногда приходится выбирать толщину диэлектрика из расчета на отсутствие ионизации.

В керамических конденсаторах высокого напряжения выравниванием поля у краев обкладок устраняется возможность появления краевой короны практически вплоть до напряжения, при котором происходит перекрытие по закраине. Для обычных типов керамики, с закрытыми порами, остается опасность ионизации во внутренних порах, что ограничивает величину допускаемой $E_р$ значениями 0,9—1,1 *кв/мм* *.

---

* В системе СИ напряженность поля измеряется в *в/м*. Для перевода в эту единицу значение E, выраженное в *кв/мм*, нужно умножить на 10^6.

При постоянном напряжении основной причиной старения органического диэлектрика являются возникающие в нем под воздействием постоянного поля электрохимические процессы. Повышение температуры заметно ускоряет эти процессы, постепенно разрушающие диэлектрик конденсатора.

В неорганических диэлектриках при постоянном напряжении также наблюдаются процессы старения, хотя природа их иная. Эти процессы так же, как и в органических диэлектриках, усиливаются с повышением температуры.

В случае ионизационного старения при переменном напряжении можно установить определенную границу значения $E_и$, ниже которой старение не должно происходить. Существует такая величина минимального напряжения, порядка 250 *в* (эффективное значение), ниже которого ионизация не возникает, так как это значение соответствует минимальной величине пробивного напряжения воздуха; при напряжениях порядка 250 *в* и ниже можно не опасаться развития ионизационных процессов.

В случае электрохимического старения при постоянном напряжении такой границы для процесса старения нет, поэтому в известных условиях при достаточной длительности воздействия напряжения может произойти пробой и при напряжениях менее 250 *в*. Таким образом, на кривой $E_{пр} = f(\tau)$ при постоянном напряжении в отличие от переменного можно ожидать непрерывное снижение $E_{пр}$ с асимптотическим приближением к оси абсцисс, а не к некоторому определенному значению $E_и$. В биологарифмическом масштабе зависимость $E_{пр} = f(\tau)$ выражается падающей прямой линией, т. е. может быть выражена уравнением

$$\lg E_{пр}' = \lg A - n \lg \tau \qquad (1\text{-}17)$$

или

$$E_{пр} = A\tau^{-n}. \qquad (1\text{-}18)$$

Это выражение часто представляют также в форме

$$\tau = \frac{B}{E_{пр}^{m}}. \qquad (1\text{-}19)$$

Для пропитанной бумаги $m = 4 \div 6$ (в среднем 5 — закон пятой степени), а для титановой керамики $m = 8 \div 9$; однако пользоваться этими значениями допустимо только в известных пределах времени старения.

В этих условиях допустимое значение $E_р$ следует устанавливать с известным запасом к длительному значению $E_{пр}$ при данном значении срока службы конденсатора. Для этого желательно иметь всю кривую старения — «кривую жизни» — рассматриваемого типа конденсатора, или те значения, при которых обеспечивается требуемый срок службы, например 10 000 *ч*. Для определения хотя бы одной точки на «кривой жизни» необходимо поставить на испытание партию однотипных конденсаторов при одном и том же значении напряженности поля и определить для каждого из них время, необходимое для его пробоя. При сравнительных испытаниях по этим значениям берут среднее и получают точку для построения «кривой жизни» с координатами $\tau_{ср}$ и E, где E — заданное значение напряженности поля.

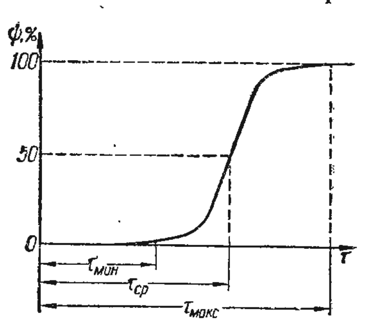


Рис. 6. Кривая зависимости интегральной вероятности пробоя от времени воздействия напряжения.

Однако для расчета величина $\tau_{ср}$ мало что дает, так как это то время, при котором при напряженности E пробьется около половины конденсаторов; какой запас надо взять по отношению к E, чтобы конденсаторы проработали время $\tau_{ср}$ не пробиваясь, остается неясным.

Поэтому практически следует брать относительно большую партию однотипных образцов, порядка 50—100 шт. (тогда пробой одного образца означает выход из строя $2 \div 1\%$ от партии), и построить кривую распределения сроков службы образцов для пробоя в виде интегральной кривой вероятности пробоя (рис. 6). При $\tau_{макс}$ пробивается вся партия (100%-ная вероятность пробоя), под $\tau_{ср}$ обычно понимают время, соответствующее пробою 50% партии. Минимальный срок службы $\tau_{мин}$ соответствует промежутку времени, после которого начинается более или менее массовый выход конденсаторов из строя. При временах менее $\tau_{мин}$ возможны отдельные пробои, носящие случайный характер.

При малых толщинах диэлектрика гарантировать отсутствие таких пробоев нельзя, так как они не могут быть полностью устранены испытанием конденсаторов на пробой кратковременным приложением повышенного испытатель-

ного напряжения. Поэтому при расчете обычно ориентируются на значение $\tau_{мин}$, соответствующее определенной малой вероятности преждевременного пробоя, порядка 1—2% или менее. Для правильного выбора толщины диэлектрика надо иметь результаты длительных испытаний конденсаторов на срок службы, причем желательно, чтобы эти испытания были проведены при толщине и емкости порядка, близкого к рассчитываемым конденсаторам, а также при верхнем пределе рабочей температуры (или при еще более высокой температуре для ускорения испытания). По этим результатам на производстве составляются таблицы допускаемых величин $E_р$ для различных значений толщины диэлектрика, номинальной емкости и срока службы при нескольких температурах. Ориентировочный пересчет найденного в таблице значения $E_р$ при одном значении емкости (площади обкладок) к другому значению при равной толщине диэлектрика можно сделать по данным, приведенным выше. Для ориентировочного пересчета от одного значения температуры к другому можно пользоваться зависимостью

$$\lg \tau_2 = \lg \tau_1 - \beta (t_2 - t_1), \tag{1-20}$$

где τ_1 и τ_2 — сроки службы при температурах t_1 и t_2 и одной и той же рабочей напряженности;

β — коэффициент, зависящий от типа диэлектрика.

В определенных условиях и при постоянном напряжении, кроме электрохимического, может проявляться ионизационное старение, которое, накладываясь на электрохимические процессы, вызывает ускоренный выход конденсатора из строя. Однако, поскольку указанные выше допускаемые значения $E_р$ получены на основе длительных испытаний на старение, т. е. взяты из опыта, можно считать, что этот опыт учитывает оба механизма старения, если они проявляются в исследуемом типе конденсатора одновременно.

Расчет электрической прочности при тепловом пробое

Тепловой пробой представляет собой нарушение теплового равновесия между количеством выделяемого в диэлектрике и отводимого от него тепла, приводящее к термическому разрушению диэлектрика. Возможность развития этого явления обусловлена тем, что активная проводимость диэлектрика возрастает с повышением температуры.

Основные теоретически выведенные формулы для вычисления напряжения при тепловом пробое получены для двух основных типов конденсаторов: плоского с обкладками неограниченных размеров по ширине и длине, когда тепловой поток направлен перпендикулярно плоскости обкладок (рис. 7,*а*), и цилиндрического с бесконечно большой длиной обкладок, когда тепловой поток направлен радиально в сторону наружной обкладки (рис. 7,*б*).

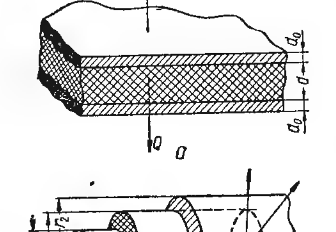


Рис. 7. Типы конденсаторов, рассмотренные в теории теплового пробоя:

а — плоский; *б* — цилиндрический.

Для плоского конденсатора пробивное напряжение при тепловом пробое

$$U_{пр} = \varphi(c)\sqrt{\frac{33{,}6\lambda}{a\gamma_0}}, \qquad (1\text{-}21)$$

где λ — коэффициент теплопроводности диэлектрика конденсатора, *кал/сек × × см · град*;

γ_0 — активная проводимость диэлектрика при температуре окружающей среды, *ом*$^{-1}\cdot$*см*$^{-1}$;

a — температурный коэффициент активной проводимости диэлектрика, представляющий собой коэффициент в показателе степени в формуле

$$\gamma = \gamma_0 e^{a(T-T_0)}, \qquad (1\text{-}22)$$

изображающей зависимость активной проводимости от температуры;

$\varphi(c)$ — функция параметра c, характеризующего влияние геометрических размеров конденсатора и условий его охлаждения на величину пробивного напряжения. Для плоского конденсатора

$$c = \frac{\lambda_э \alpha_т d}{2\lambda(\lambda_э + \alpha_т d_э)}; \qquad (1\text{-}23)$$

$\lambda_э$ — коэффициент теплопроводности материала электродов, *кал/сек · см · град*;

$\alpha_т$ — коэффициент теплоотдачи, *кал/сек · см*^{2} *· град*;

d — толщина диэлектрика, *см*;

$d_э$ — толщина электрода, *см*.

При постоянном напряжении активная проводимость $\gamma = \frac{1}{\rho}$, где ρ — удельное объемное сопротивление диэлектрика, *ом·см*.

В этом случае пробивная напряженность при тепловом пробое

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{d} = 5{,}8\,\frac{\varphi(c)}{d}\sqrt{\frac{\lambda\rho_0}{a}}\ \ в/см. \qquad (1\text{-}24)$$

Значение ρ_0 можно найти по величине постоянной времени конденсатора RC при температуре окружающей среды, используя формулу

$$\rho_0 = \frac{RC}{0{,}884\varepsilon}\cdot 10^{13}, \qquad (1\text{-}25)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость диэлектрика и RC, *сек* (или *Мом·мкф*).

Поскольку постоянная времени зависит от напряжения, желательно, чтобы значение RC, используемое для расчета, определялось при напряжении, по возможности близкому к ожидаемому напряжению теплового пробоя.

Зависимость RC от температуры обычно выражается эмпирической формулой, пользуясь которой, можно найти коэффициент β, измерив значения $(RC)_1$ и $(RC)_2$ при двух значениях температуры t_1 и t_2:

$$\lg (RC)_2 = \lg (RC)_1 - \beta (t_2 - t_1). \qquad (1\text{-}26)$$

Входящий в расчетную формулу коэффициент $a = 2{,}3\beta$. Значение коэффициента теплопроводности на практике выражают в *вт/см · град*, чтобы получить значение λ в *кал/сек·см·град*, подставляемое в формулу для вычисления $E_{пр}$ при тепловом пробое, необходимо численное значение λ, выраженное в *вт/см · град*, умножить на переводной коэффициент 0,24 *.

Коэффициент теплоотдачи $\alpha_т$ для предварительных расчетов можно принимать равным $3\cdot 10^{-4}$ *кал/сек²·град*. Если определено значение $\alpha_т$, выраженное в *вт/см² град*, то его численную величину надо также умножить на 0,24 **.

---

* В системе СИ коэффициент теплопроводности выражается в *вт/м · град*. Для перевода в систему СИ значение λ, выраженное в *вт/см · град*, нужно умножить на 10^{-2}.

** В системе СИ коэффициент теплоотдачи выражается в *вт/м²* × × *град*. Для перевода в систему СИ значение $\alpha_т$, выраженное в *вт/см²* × × *град*, нужно умножить на 10^{-4}.

По вычисленному значению параметра c соответствующая ему величина $\varphi(c)$ находится по табл. 1.

Таблица 1

Значения $\varphi(c)$

c	$\varphi(c)$	c	$\varphi(c)$	c	$\varphi(c)$
0,010	0,040	0,10	0,13	1,0	0,37
0,015	0,050	0,15	0,16	1,5	0,43
0,020	0,065	0,20	0,18	2,0	0,46
0,025	0,070	0,25	0,20	2,5	0,48
0,030	0,075	0,30	0,22	3,0	0,51
0,035	0,080	0,35	0,24	3,5	0,52
0,040	0,085	0,40	0,26	4,0	0,54
0,045	0,090	0,45	0,27	4,5	0,55
0,050	0,095	0,50	0,28	5,0	0,56
0,055	0,100	0,55	0,29	5,5	0,565
0,060	0,103	0,60	0,31	6,0	0,57
0,070	0,110	0,70	0,32	7,0	0,58
0,080	0,118	0,80	0,34	8,0	0,59
0,090	0,123	0,90	0,36	9,0	0,60

При переменном напряжении активная проводимость

$$\gamma = \frac{\varepsilon f \operatorname{tg} \delta}{1,8 \cdot 10^{12}}, \qquad (1\text{-}27)$$

где f — частота, *гц*;
$\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла потерь диэлектрика.

В этом случае пробивная напряженность при тепловом пробое

$$E_{пр} = 7,78 \cdot 10^6 \frac{\varphi(c)}{d} \sqrt{\frac{\lambda}{a f \varepsilon \operatorname{tg} \delta_0}}. \qquad (1\text{-}28)$$

Если зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от температуры выражена формулой

$$\lg \operatorname{tg} \delta = A + \xi (t - t_1), \qquad (1\text{-}29)$$

то для вычисления $E_{пр}$ надо взять значение $a = 2,3\xi$.

Величина $\operatorname{tg} \delta_0$, используемая для вычисления $E_{пр}$, представляет собой значение тангенса угла потерь диэлектрика при температуре окружающей среды t_0, для которой ведется расчет. Этот расчет имеет смысл вести лишь тогда, когда t_0 больше температуры t_1, при которой начинает возрастать $\operatorname{tg} \delta$.

Приведенные формулы для вычисления $E_{пр}$ соответствуют простейшей схеме конденсатора: диэлектрику и двум

обкладкам. Практически приходится учитывать наличие дополнительных тепловых сопротивлений в виде слоя изоляции от корпуса, слоя заливочной массы, пластмассовой опрессовки и т. п. Эти тепловые сопротивления значительно выше теплового сопротивления металлических обкладок, которым можно пренебречь при расчете. В формуле для вычисления параметра c можно в связи с этим рассматривать такие тепловые сопротивления вместо теплового сопротивления электрода, подставляя взамен $d_э$ толщину указанных изоляционных слоев, а вместо $\lambda_э$ — значение коэффициента теплопроводности этих слоев. Тепловым сопротивлением стенок металлического корпуса, если таковой имеется, можно пренебречь, как и тепловым сопротивлением обкладок.

Если конденсаторная секция представляет собой стопку наложенных одна на другую M пластинок диэлектрика толщиной d_1 каждая, разделенных обкладками, то для расчета $E_{пр}$ при тепловом пробое можно пользоваться приведенными выше формулами при условии, что вместо значения d в формулу подставляется сумма всех толщин пластинок диэлектрика, т. е. принимается $d = Md_1$. При расчете плоскопрессованного намотанного (спирального) конденсатора можно рассматривать его плоскую часть, как многопластинчатый плоский конденсатор и принять $d = 4wd_1$, где w — число витков, а d_1 — толщина диэлектрика между обкладками.

В случае цилиндрического конденсатора выражения для вычисления $E_{пр}$, *в/см*, при тепловом пробое имеют вид:

при постоянном напряжении

$$E_{пр} = 4{,}1\,\frac{\varphi(c)}{d}\sqrt{\frac{\lambda\rho_0}{a}}; \qquad (1\text{-}30)$$

при переменном напряжении с частотой f

$$E_{пр} = 5{,}52\cdot 10^6\,\frac{\varphi(c)}{d}\sqrt{\frac{\lambda}{a\varepsilon f\,\mathrm{tg}\,\delta}}. \qquad (1\text{-}31)$$

Величина параметра c подсчитывается по измененной формуле

$$c = \frac{2{,}3\lambda_э\alpha_т r_1 \lg\frac{r_1}{r_0}}{\lambda\left(\lambda_э + 2{,}3\alpha_т r_1 \lg\frac{r_2}{r_1}\right)}, \qquad (1\text{-}32)$$

где r_0 — внутренний радиус слоя диэлектрика (радиус внутреннего электрода), *см*;

r_1 — наружный радиус слоя диэлектрика, *см*;

r_2 — наружный радиус внешнего электрода, *см*.

Обозначения λ, $\lambda_э$ и $\alpha_т$ — те же, что и раньше.

Если цилиндрическая конденсаторная секция представляет собой намотанный конденсатор, то под величиной r_0 надо понимать радиус намоточной оправки (т. е. радиус внутреннего отверстия в конденсаторе), а под величиной r_1 — радиус внешней окружности конденсаторной секции. Вместо толщины диэлектрика в формулы для расчета $E_{пр}$ надо подставлять суммарную толщину изоляции всех витков конденсаторной секции. Пренебрегая толщиной обкладок, можно написать

$$d = r_1 - r_0.$$

Если секция конденсатора не имеет корпуса и относительно толстого слоя влагозащитного покрытия на поверхности (например, конденсаторы типа «дуропласт», керамические трубчатые конденсаторы и т. п.), то, приняв $r_2 \approx r_1$, получим упрощенное выражение для параметра c:

$$c = 2{,}3 \frac{\alpha_т}{\lambda} r_1 \lg \frac{r_1}{r_0}. \qquad (1\text{-}33)$$

Если на поверхности секции расположен достаточно толстый влагозащитный слой (опрессовка пластмассой, слой облицовочного компаунда) или она помещена в металлический корпус, от стенок которого ее отделяет достаточно толстый слой изоляции, то толщину этого слоя следует рассматривать как толщину электрода и в формуле для расчета параметра c принимать за r_2 наружный радиус, а за $\lambda_э$ — коэффициент теплопроводности этого слоя.

В обоих рассматриваемых случаях формулы выведены без учета теплоотвода с торцов конденсатора. Поэтому при расчете по данным формулам получается несколько заниженная величина напряжения, при которой возможен тепловой пробой. Так, если при расчете на тепловой пробой получен отрицательный результат, т. е. пробивное напряжение меньше рабочего значения или равно ему, то это еще не означает, что конденсатор обязательно погибнет от теплового пробоя. Однако такой результат указывает на необходимость изготовить опытный образец конденсатора и

проверить устойчивость его работы при заданном рабочем напряжении и максимально возможной в эксплуатации температуре окружающей среды.

Пример. Рассчитаем напряжение теплового пробоя для металлобумажного конденсатора при $C = 0{,}5$ *мкф*, номинальном рабочем напряжении 2000 *в*, температуре 85° С.

Найти пробивное напряжение при 100° С. Габаритные размеры и конструкция показаны на рис. 8. Толщина диэлектрика 5 × 10 *мк*, что с учетом лакировки одного слоя дает суммариую толщину 51 *мк*; конденсатор собран из четырех секций, соединенных параллельно и поставленных на ребро. Секции изолированы от корпуса *1* кабельной бумагой толщиной 60 *мк* и коробочкой из электрокартона толщиной 0,5 *мм* (вместе обозначены *3*). С двух сторон пакета секций поставлены уплотняющие клинья (картон) *2* толщиной 1 *мм*. Поскольку торцы секций отделены от узкой стенки корпуса (35 × 50 *мм*) воздушным зазором *4*, представляющим собой большое тепловое сопротивление, можно считать, что основной тепловой поток изнутри конденсатора будет направлен к широкой стороне корпуса (45 × 50 *мм*), к которой секции плотно прижаты клиньями. Между пакетом секций и дном и между пакетом и крышкой также будут воздушные зазоры, затрудняющие движение тепла, поэтому можно считать, что конденсатор плоский и использовать при расчете формулу (1-24). Значение параметра c находим по формуле (1-23).

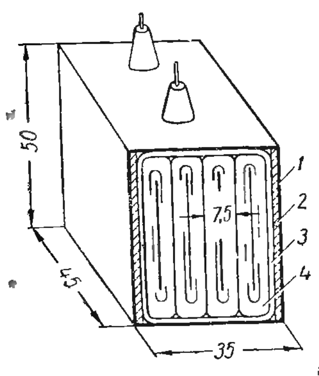


Рис. 8. К расчету теплового пробоя металлобумажного конденсатора.

Принимаем: толщина диэлектрика для расчета напряжения теплового пробоя равна толщине пакета секций, т. е. $7{,}5 \times 4 = 30$ *мм* или $d = 3$ *см*; толщина «электрода», т. е. толщина суммарной изоляции от корпуса (кабельная бумага, коробочка, клин) равна $0{,}06 + 0{,}5 + 1 = 1{,}56$ *мм* или $d_э = 0{,}156$ *см*. Коэффициент теплоотдачи $\alpha_т = 1 \cdot 10^{-3}$ *вт/см² · град* или $\alpha_т = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}24 = 2{,}4 \times 10^{-4}$ *кал/сек · см² · град*. Коэффициент теплопроводности для пропитанной бумаги (диэлектрик), а также для пропитанного электрокартона принимаем $\lambda = \lambda_э = 5 \cdot 10^{-4}$ *кал/сек · град*. Тогда по формуле (1-23)

$$c = \frac{5 \cdot 10^{-4} \cdot 2{,}4 \cdot 10^{-4} \cdot 3}{2{,}5 \cdot 10^{-4}(5 \cdot 10^{-4} + 2{,}4 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}156)} = 0{,}67.$$

По табл. 1 при $c = 0{,}67$ находим $\varphi(c) = 0{,}32$.

Для пропитанной бумаги в металлобумажном конденсаторе при повышенной плотности бумаги и неполярной пропиточной массе можно принять $\varepsilon \approx 4$.

Измерения постоянной времени показали, что при 100° С и напряжении 1500 *в* $RC = 10$ *Мом · мкф* и $\beta \approx 0{,}03$. Находим удельное сопро-

тивление диэлектрика при температуре окружающей среды 100° С по формуле (1-25)

$$\rho_0 = \frac{10 \cdot 10^{13}}{0{,}884 \cdot 4} = 2{,}8 \cdot 10^{13} \text{ ом} \cdot \text{см},$$

температурный коэффициент $a = 2{,}3\,\beta = 2{,}3 \cdot 0{,}03 = 0{,}069$. Подставляя в формулу (1-24) значения $d = 3$ *см*, $\varphi(c) = 0{,}32$, $\lambda = 5 \cdot 10^{-4}$ *кал/сек* × × *см · град*, $\rho_0 = 2{,}8 \cdot 10^{13}$ *ом · см* и $a = 0{,}069$, вычисляем $E_{пр}$, рассматривая пакет секций как массивный кусок диэлектрика с толщиной, равной толщине пакета. Естественно, что величина $U_{пр}$ для такого толстого образца получилась бы при расчете по исходной формуле (1-21) очень большой, но поскольку при вычислении $E_{пр}$ вводится в знаменатель столь же увеличенное значение толщины d, то отношение увеличенного напряжения $U_{пр}$ к увеличенной толщине дает нормальное значение

$$E_{пр} = \frac{5{,}8 \cdot 0{,}32 \sqrt{5 \cdot 10^{-4} \cdot 2{,}8 \cdot 10^{13}}}{3\sqrt{0{,}069}} = \frac{2{,}22 \cdot 10^4}{0{,}79} = 2{,}81 \cdot 10^4 \text{ в/см} = 28{,}1 \text{ кв/мм}.$$

Для нахождения пробивного напряжения конденсатора при тепловом пробое надо это значение $E_{пр}$ умножить на истинную толщину диэлектрика, разделяющего обкладки конденсатора, т. е. в данном случае на 51 *мк* или 0,051 *мм*. Тогда получаем

$$U_{пр} = 28{,}1 \cdot 0{,}051 = 1{,}43 \text{ кв} = 1430 \text{ в}.$$

Таким образом, расчет показал, что в данном случае при повышении температуры от нормального верхнего значения 85° С до 100° С напряжение теплового пробоя оказывается ниже номинального рабочего напряжения конденсатора при 85° С (2000 *в* постоянного тока). Следовательно, применять данный конденсатор при 100° С можно лишь при значительном снижении допускаемого рабочего напряжения в сравнении с рабочим значением.

Вывод формулы для расчета пробивной напряженности при тепловом пробое с учетом теплоотдачи как с широкой, так и с узкой стороны корпуса (теплоотдача со дна и с крышки не учитывается), применительно к бумажно-масляному конденсатору переменного напряжения, выполнил М. И. Мантров. Полученное им выражение имеет вид:

$$E_{пр} = 1{,}66 \cdot 10^6 \times \sqrt{\frac{S\alpha_т}{a\varepsilon f \operatorname{tg}\delta_0 \left\{V_{а.с} MN(1+\alpha_т\xi) + \frac{\alpha_т S}{8}\left[\frac{(b_с-\Delta_с)^2}{\lambda_\parallel} + \frac{2b\Delta_с - \Delta_с^2}{\lambda_\perp}\right]\right\}}}. \quad (1\text{-}34)$$

Здесь S — боковая поверхность охлаждения конденсатора, $см^2$;

$\alpha_г$ — коэффициент теплоотдачи с поверхности корпуса, *кал/сек·см²·град*;

a — температурный коэффициент тангенса угла потерь;

ε — диэлектрическая проницаемость пропитанной маслом бумаги;

f — частота, *гц*;

$V_{а.с}$ — активный объем изоляции в одной секции, $см^3$;

M — число параллельно соединенных секций в группе;

N — число последовательно включенных групп секций;

ξ — сумма отношений толщин соответствующих слоев, оказывающих тепловое сопротивление, к значениям коэффициента теплопроводности этих слоев, *см²·град·сек/кал*;

$b_с$ — ширина секции, *см*;

$\Delta_с$ — толщина секции, *см*;

$\lambda_\perp$ — коэффициент теплопроводности секций в направлении, перпендикулярном слоям бумаги и фольги, *кал/сек·см·град* (поперечный);

$\lambda_\parallel$ — коэффициент теплопроводности секций в направлении, параллельном плоскости слоев бумаги и фольги, *кал/сек·см·град* (продольный) (см. ниже).

Отдельные величины, входящие в формулу, определяются следующими выражениями.

Активный объем изоляции в секции

$$V_{а.\,с} = 2b_0 l d, \qquad (1\text{-}35)$$

где b_0 — ширина фольги, *см*;
l — длина фольги, *см*;
d — толщина бумаги между обкладками, *см*.

Величина

$$\xi = \frac{\Delta_1}{\lambda_1} + \frac{\Delta_2}{\lambda_2} + \frac{\Delta_3}{\lambda_3}, \qquad (1\text{-}36)$$

где Δ_1 и λ_1 — толщина и коэффициент теплопроводности стенки бака;

Δ_2 и λ_2 — то же, для масляной прослойки между стенкой бака и изоляцией от корпуса;

$\Delta_з$ и $\lambda_з$ — то же, для слоя изоляции пакета секций от корпуса (значения Δ в *см*, значения λ — в *кал/сек·см град*).

Для уменьшения опасности теплового пробоя конденсаторов, работающих при повышенных температурах окружающей среды, следует выбирать диэлектрик с малой зависимостью угла потерь (проводимости) от температуры (т. е. с малым значением a) и при конструировании конденсатора заботиться об улучшении отвода тепла от его внутренних частей, избегать воздушных зазоров с большим тепловым сопротивлением и ограничиваться минимальной толщиной слоя изоляции от корпуса.

Расчет изоляции между последовательно включенными секциями конденсатора и его изоляции от корпуса

При расчете электрической прочности конденсатора следует учитывать возможность пробоя между последовательно включенными секциями и между секцией (или пакетом секций) и корпусом конденсатора, если последний изготовлен из металла.

При последовательном соединении секций два вывода соседних секций соединяются накоротко, а между двумя другими возникает напряжение, равное удвоенному напряжению каждой секции:

$$2U_с = \frac{2}{N} U_н,$$

где N — число последовательно включенных секций (или групп секций). На это напряжение и должен быть рассчитан слой изоляции между двумя соседними секциями (или группами секций), соединяемыми последовательно. Чаще всего изоляцию рассчитывают на кратковременную прочность, исходя из величины испытательного напряжения $U_{исп}$, учитывая его долю, приходящуюся на две секции: $\frac{2}{N} U_{исп}$. Для изоляции между секциями из соображений механической прочности применяют обычно материалы увеличенной толщины (например, вместо конденсаторной бумаги — кабельную, вместо конденсаторной слюды — толстую «защитную» слюду и т. п.). Это обеспечивает большой запас электрической прочности межсекционной изоляции в обычных конструкциях.

При использовании металлических корпусов конденсаторные секции или пакеты должны быть изолированы от корпуса. Эту изоляцию прежде всего рассчитывают на кратковременную электрическую прочность при испытательном напряжении, установленном для проверки изоляции от корпуса. Это напряжение может значительно превышать величину испытательного напряжения между выводами конденсатора, прикладываемого для проверки электрической прочности активного диэлектрика.

При напряжениях порядка сотен вольт толщина изоляции от корпуса выбирается по соображениям механической прочности (для защиты секций от повреждений при монтаже в корпусе); при этом большой запас электрической прочности изоляции от корпуса обеспечивается автоматически.

При высоких напряжениях толщина изоляции от корпуса выбирается с учетом получения достаточной электрической прочности и рассчитывается по формуле

$$d = k\frac{U_{\text{исп}}}{E_{\text{пр}}} + \Delta, \qquad (1\text{-}37)$$

где $U_{\text{исп}}$ — испытательное напряжение между выводами конденсатора и корпусом, *кв*;

$E_{\text{пр}}$ — кратковременная прочность материала, использованного для изоляции от корпуса, *кв/мм*;

k — коэффициент запаса;

Δ — дополнительный слой изоляции для учета ее возможного механического повреждения при монтаже конденсатора, *мм*.

Обычно изоляция от корпуса значительно толще активного диэлектрика конденсатора, особенно при использовании последовательного соединения секций. С увеличением толщины изоляции величина ионизирующей напряженности резко снижается, поэтому в условиях эксплуатации конденсатора при переменном или импульсном напряжении в слое изоляции от корпуса может возникнуть ионизация, приводящая к пробою корпусной изоляции. В этом случае целесообразно разбить корпусную изоляцию на ряд последовательно включенных слоев уменьшенной толщины, разделенных прокладками из фольги или металлизированной бумаги, которые обеспечивают принудительное распределение напряжения между слоями изоляции. В результате увеличивается значение $E_{\text{и}}$ и можно исключить ионизацию в корпусной изоляции.

Если конденсатор помещается в изоляционный корпус, но пакет секций стягивается металлической обжимкой, то все сказанное можно отнести к слою изоляции, отделяющему секции от обжимки. При этом, если один из выводов конденсатора соединен с обжимкой (или корпусом), вместо применения изоляции от корпуса (от обжимки) целесообразно собирать конденсатор из двух групп секций, соединенных параллельно (см. рис. 129). При этом один вывод присоединяется к общей точке обеих групп секций, а второй — берется от обжимки (от корпуса), соединенной со вторыми концами обеих групп секций. Толстая изоляция от обжимки (корпуса) при этом не нужна.

При расчете изоляции от корпуса надо иметь в виду, что излишняя толщина вызывает увеличение теплового сопротивления на пути тепла, выделяющегося в конденсаторе и движущегося к стенкам корпуса, в результате чего увеличивается перегрев конденсатора.

§ 3. РАСЧЕТ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРОВ

Определив толщину активного диэлектрика на основе расчета электрической прочности конденсатора и зная его номинальную емкость, можно установить основные размеры секции конденсатора, используя соответствующую формулу емкости.

Известно, что емкостью конденсатора называют отношение заряда Q, накопленного в конденсаторе, к напряжению, приложенному к его обкладкам:

$$C = \frac{Q}{U}, \tag{1-38}$$

где C — в фарадах (*ф*); Q — в кулонах (*k*) и U — в вольтах (*в*).

Практически пользуются единицами емкости меньшими, чем фарада — микрофарадой (*мкф*) или пикофарадой (*пф*),

$$1\ ф = 1 \cdot 10^6\ мкф = 1 \cdot 10^{12}\ пф.$$

При небольших значениях номинальной емкости, когда диэлектрик можно отформовать в виде трубки, используют цилиндрический (трубчатый) конденсатор, емкость которого

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon l}{\ln\frac{R_2}{R_1}}\ ф, \tag{1-39}$$

где l — длина цилиндрического электрода (обкладки), *см*, имеется в виду активная длина, на которой наружная и внутренняя обкладки конденсатора перекрываются (рис. 9);

R_1 — наружный радиус внутреннего электрода, *см*;

R_2 — внутренний радиус наружного электрода, *см*;

ε — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика, разделяющего электроды (обкладки конденсатора);

ε_0 — электрическая проницаемость вакуума, *ф/см*,

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^{11}}. \quad (1\text{-}40)$$

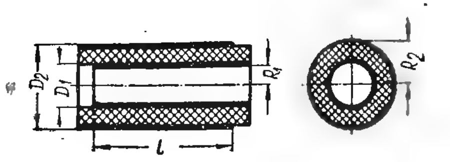


Рис. 9. К расчету емкости цилиндрического конденсатора.

Формулу (1-40) можно представить и в ином виде, более удобном для практических расчетов,

$$C = 0{,}241 \frac{\varepsilon l}{\lg \frac{D_2}{D_1}} \text{ пф}, \quad (1\text{-}41)$$

где D_2 — наружный диаметр конденсатора (по диэлектрику), *см*;

D_1 — внутренний диаметр конденсатора (по диэлектрику), *см*.

Значения l и ε те же, что и для формулы (1-39).

В данном случае из расчета на электрическую прочность (или по тепловому расчету) известна толщина стенки трубки $d = \frac{D_2 - D_1}{2}$.

Чтобы найти значение l, соответствующее заданной емкости, надо задаться значением внутреннего или наружного диаметра трубки. Предполагается, что тип диэлектрика уже выбран, т. е. ε известно.

Если диэлектрик имеет форму пластинки или плоского диска (слюда, стеклопленка, керамика), то применяется плоский тип конденсатора (рис. 10), емкость которого

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d} \text{ ф}, \quad (1\text{-}42)$$

где d — толщина диэлектрика, *см*;

S — активная площадь обкладок, *см*^{2}.

Активной площадью обкладок называется площадь, на которой нижняя обкладка перекрывается верхней. Произведение Sd определяет активный объем диэлектрика, создающий емкость конденсатора.

Подставляя в выражение (1-42) значение ε_0 из формулы (1-40) и выражая емкость в *пф*, получаем

$$C = 0{,}0885 \frac{\varepsilon S}{d}. \qquad (1\text{-}43)$$

Для увеличения емкости стопку из M плоских конденсаторов соединяют параллельно, электрически приключая

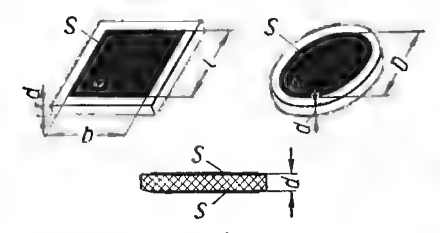


Рис. 10. К расчету емкости плоского конденсатора.

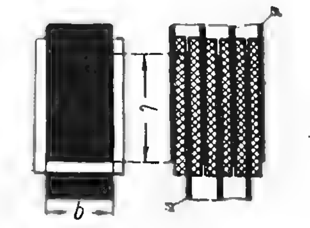


Рис. 11. К расчету емкости многопластинчатого конденсатора.

обкладки, разделенные пластинками диэлектрика, через одну, как показано на рис. 11. Число обкладок в таком многопластинчатом конденсаторе будет равно $M + 1$, а емкость его увеличивается в M раз в сравнении с исходным плоским конденсатором:

$$C = 0{,}0885 \frac{\varepsilon S M}{d}. \qquad (1\text{-}44)$$

По исходной формуле (1-43) для плоского конденсатора, зная C и d, находят площадь обкладки S. Для конденсатора дисковой формы диаметр электрода (обкладки)

$$D = 2\sqrt{\frac{S}{\pi}}. \qquad (1\text{-}45)$$

При пластинчатой форме площадь обкладки $S = bl$, где b — ширина, а l — длина обкладки. Чтобы вычислить один из размеров обкладки, например ширину (после того как по расчету найдено значение S), надо задаться вторым размером — длиной.

Для многопластинчатого конденсатора в формуле (1-44) уже два неизвестных — S и M (считаем, что C задано, а d

определено расчетом), а потому одним из них надо задаваться из конструктивных соображений, чтобы можно было найти второе.

При использовании тонких диэлектриков, поставляемых в рулонной форме (конденсаторная бумага, синтетические пленки), для получения больших значений емкости применяются намотанные (спиральные) секции (рис. 12), представляющие спирали, намотанные из двух обкладок 1 и 2 и двух лент диэлектрика, толщиной d каждая. Если развернуть такую спираль, то получится плоский конденсатор в виде длинной ленты с активными размерами обкладок: длиной l и шириной b при толщине диэлектрика d. Емкость такого конденсатора можно вычислить по формуле (1-43), полагая $S = lb$. В развернутой ленте работает только один слой диэлектрика — между обкладками. Когда лента намотана в спираль, то, как видно из рис. 12, обе ленты диэлектрика попадают в электрическое поле между обкладками, поэтому емкость будет в два раза большей, чем в развернутом состоянии,

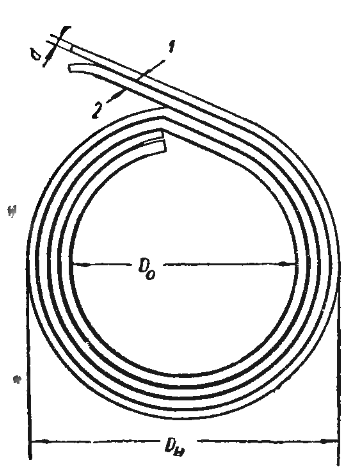


Рис. 12. К расчету емкости спирального конденсатора.

$$C = 0{,}177 \frac{\varepsilon bl}{d}. \qquad (1\text{-}46)$$

Здесь C — в *пф*, когда b, d — в *см*. Если выразить d в *мк* (1 *мк* $= 1 \cdot 10^{-3}$ *мм*), b — в *см* и l — в *м*, то емкость получим в более крупных единицах — *мкф*.

Если размеры подставлены в *см* (d, b и l), то для получения емкости в *мкф* применяется формула

$$C = 1{,}77 \cdot 10^{-7} \frac{\varepsilon bl}{d}, \qquad (1\text{-}47)$$

в которую введен соответствующий численный множитель.

Активная длина обкладки будет меньше полной длины l', так как внешняя поверхность верхней ленты диэлектрика (рис. 12) в последнем витке (начиная от намоточной оправки)

не соприкасается с обкладкой и не участвует в создании емкости, поэтому полную длину обкладки надо уменьшить на половину длины наружного витка

$$l = l' - \frac{\pi}{2} D_{н}. \qquad (1\text{-}48)$$

Для намотанной цилиндрической секции длина обкладки

$$l = \pi w D_{ср}, \qquad (1\text{-}49)$$

где w — число витков;

$D_{ср}$ — средний диаметр секции,

$D_{ср} = \frac{D_{н} + D_{о}}{2}$;

$D_{н}$ — наружный диаметр секции;

$D_{о}$ — внутренний диаметр секции, равный диаметру намоточной оправки.

Подставляя уравнение (1-49) в уравнение (1-47), получаем

$$C = 5{,}65 \cdot 10^{-7} \frac{\varepsilon D_{ср} w b}{d}. \qquad (1\text{-}50)$$

Размеры d, b и $D_{ср}$ — в *см*, C — в *мкф*.

Число витков w необходимо знать при намотке конденсаторных секций, так как оно определяет число оборотов, которое должна сделать намоточная оправка для получения заданного значения емкости.

Решив уравнение (1-50) относительно w, получим

$$w = 1{,}77 \cdot 10^{6} \frac{Cd}{\varepsilon D_{ср} b}. \qquad (1\text{-}51)$$

Средний диаметр намотанной цилиндрической секции можно выразить через толщину секции $2(d + d_{ф})w$ и диаметр намоточной оправки $D_{о}$:

$$D_{ср} = D_{о} + 2(d + d_{ф}) w, \qquad (1\text{-}52)$$

где $d_{ф}$ — толщина обкладки (электрода), *см*;

2 — множитель, соответствующий количеству слоев диэлектрика в каждом витке и количеству электродов.

Подставляя формулу (1-52) в (1-51) и решая полученное квадратное уравнение относительно w, получим

$$w = \frac{\sqrt{D_{о}^{2} + \frac{1{,}44 \cdot 10^{6} Cd (d + d_{ф})}{\varepsilon b}} - D_{о}}{4(d + d_{ф})}. \qquad (1\text{-}53)$$

Все размеры даны в *см* и емкость в *мкф*.

При намотке на тонкую плоскую оправку шириной B

$$w = \sqrt{k_1 C + k_2^2} - k_2, \tag{1-54}$$

где $k_1 = \frac{7{,}05 \cdot 10^5 d}{\varepsilon b (d + d_ф)}$ и $k_2 = \frac{1{,}25 \cdot 10^3 B}{d + d_ф}$;

b и B в *см*, а d и $d_ф$ — в *мк*; значение C — подставляется в *мкф*.

В таком виде эту формулу удобно применять для расчета плоскопрессованных секций, намотанных на тонкую плоскую оправку шириной B. При намотке на цилиндрическую оправку диаметром $D_о$ следует принимать $B = \frac{\pi D_о}{2}$, поскольку ширина первого витка, если он сплющен при плоской прессовке цилиндрической секции, равна половине длины окружности оправки.

При расчете секций цилиндрического типа, намотанных на цилиндрическую оправку, часто определяют сначала наружный диаметр намотанной секции

$$D = \sqrt{D_о^2 + k_н C}, \tag{1-55}$$

где $k_н = \frac{0{,}144 (d + d_ф) d}{\varepsilon b}$; C — в *мкф*; D, $D_о$ и b — в *см*; d и $d_ф$ — в *мк*, а затем уже находят число витков

$$w = \frac{2{,}5 \cdot 10^3 (D - D_о)}{d + d_ф}. \tag{1-56}$$

Формулы (1-55) и (1-56) легко получить, если представить спиральную секцию как систему из коаксиально расположенных цилиндрических конденсаторов, соответствующих емкостям отдельных витков и соединенных параллельно. При нахождении емкости такой системы надо исходить из емкости среднего витка, определяемого средним значением диаметра секции. По этим формулам удобно вести расчет, когда изготовляется секционированный намотанный конденсатор, секции которого наматываются одна на другую и соединяются параллельно или последовательно. Сначала рассчитывают первую секцию, для которой при заданных значениях $C_с$ и $D_о$ находят число витков w_1 и наружный диаметр D_1. При расчете второй секции за диаметр оправки принимают уже D_1 и находят соответствующие значения w_2 и наружного диаметра D_2. Этот диаметр принимают за диаметр оправки при расчете третьей секции и т. д.

Во всех рассмотренных формулах емкость рассеяния у краев обкладок не принималась во внимание, т. е. предполагалось, что емкость создается только активной частью диэлектрика, непосредственно находящегося под площадью перекрытия обкладок в однородном электрическом поле. Это допустимо для относительно больших значений емкости, когда отношение размеров обкладок к толщине диэлектрика достаточно велико.

Для конденсаторов малой емкости, в частности керамических, иногда необходимо учитывать возрастание емкости, обусловленное рассеянием у краев обкладок. Для этой цели обычно применяют ряд эмпирических формул.

В плоском дисковом конденсаторе, у которого площадь электрода совпадает с площадью диэлектрика, приращение емкости за счет рассеяния (краевая емкость)

$$C_{к} = 1{,}5\frac{d}{D}\left[\ln\left(25\frac{D}{d}\right) - 1{,}305\right] \text{ пф}, \qquad (1\text{-}57)$$

где D — диаметр диска, *см*;

d — толщина диэлектрика, *см*.

Если край электрода не совпадает с краями диэлектрика, т. е. имеется закраина, то для суммарной емкости, с учетом емкости рассеяния, можно применять приближенные формулы:

плоский дисковый конденсатор

$$C = 0{,}0694\frac{\varepsilon (D + kd)^2}{d}; \qquad (1\text{-}58)$$

цилиндрический (трубчатый) конденсатор

$$C = 0{,}241\frac{\varepsilon (l + kd)}{\lg \frac{D_2}{D_1}}. \qquad (1\text{-}59)$$

В этих формулах D — диаметр электрода для диска, *см*;

l — длина электрода для трубки, *см*;

D_1 и D_2 — соответственно внутренний и внешний диаметр трубки, *см*;

d — толщина диэлектрика, *см*;

k — коэффициент, зависящий от формы поля, $k \approx 0{,}5$.

Для керамических конденсаторов высокого напряжения применяется утолщение материала у краев электродов для выравнивания поля с целью повышения напряжения начала короны. При этом увеличивается количество твердого

диэлектрика, попадающего в поле рассеяния, и возрастает краевая емкость. Вызванное этим увеличение общей емкости конденсатора можно учесть эмпирической поправкой, добавляемой к диаметру электрода для дисковых конденсаторов или к длине электрода для трубчатых и горшковых конденсаторов (рис. 13). Величина этой поправки Δ зависит от толщины диэлектрика и от радиуса r, по которому дается закругление у края электрода.

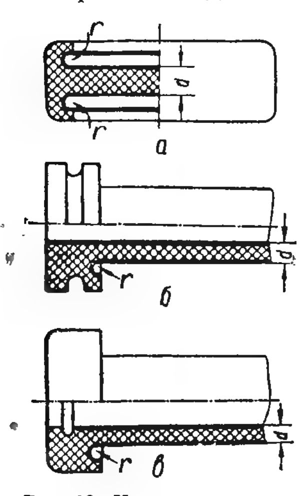


Рис. 13. К расчету поправки на краевую емкость конденсатора:
а — дискового; *б* — трубчатого; *в* — горшкового.

Для конденсаторов плоского типа поправка к диаметру электрода

$$\Delta = 0{,}41\,(d + 2r). \qquad (1\text{-}60)$$

Для конденсаторов трубчатого типа поправка, вычисленная по такой же формуле, добавляется к длине электрода. Для конденсаторов горшкового типа поправка к длине электрода

$$\Delta = 0{,}41\left(\frac{d}{2} + r\right). \qquad (1\text{-}61)$$

Формулы (1-60) и (1-61) показывают, что поправка на краевую емкость увеличивается с повышением толщины диэлектрика и радиуса закругления, т. е. делается более заметной с уменьшением емкости и возрастанием номинального рабочего напряжения конденсатора.

§ 4. РАСЧЕТ ИНДУКТИВНОСТИ КОНДЕНСАТОРОВ

Ток, протекая через конденсатор, вызывает появление магнитного поля вокруг его токоведущих частей, а следовательно, создает некоторую индуктивность конденсатора.

В конденсаторе можно выделить следующие составляющие индуктивности: выводов конденсатора в целом, выводов отдельных секций, межсекционных соединений, обкладок, а также индуктивность, обусловленную магнитным полем, созданным током, который протекает через диэлектрик.

Если принять последовательную эквивалентную схему для изображения конденсатора, т. е. считать, что его ем-

кость C, индуктивность L и сопротивление r, эквивалентное потерям, включены последовательно, то полное сопротивление конденсатора

$$z = \sqrt{r^2 + (x_C - x_L)^2} = \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}. \quad (1\text{-}62)$$

При увеличении частоты емкостное сопротивление $x_C = \frac{1}{\omega C}$ снижается, а индуктивное $x_L = \omega L$ — возрастает, поэтому частотная зависимость полного сопротивления имеет U-образный характер и проходит через минимум при резонансной частоте $f_р = \frac{\omega_р}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. При частотах выше резонансной конденсатор представляет собой уже не емкостное, а индуктивное сопротивление. Ниже показан порядок величин индуктивности для некоторых типов конденсаторов постоянной емкости с твердым диэлектриком.

Индуктивность некоторых типов конденсаторов

	миллимикрогенри (*см*)
Керамический дисковый КДК-3	1—1,5
» трубчатый КТК-3—КТК-5	20—30
Слюдяной опрессованный КСО-1—КСО-7	4—6
» блокировочный	50—100
Бумажный КБГ-И, цилиндрический . .	6—11
» помехозащитный КБП-Ф . .	0,5—6,5
» » КБП-Ф . .	0,5—6,5
Малоиндуктивный импульсный конденсатор	5—10
Отдельные секции бумажных силовых конденсаторов	200—4800
Бумажный большой емкости со смещенными выводами (рис. 15)	До 150 000

Для большинства радиоконденсаторов небольшой емкости резонансная частота превышает 1—10 *Мгц*.

В связи с высокими значениями $f_р$ индуктивность конденсаторов обычно приходится учитывать только для радиоконденсаторов, работающих в области верхнего диапазона радиочастот, а также для ряда импульсных конденсаторов, поскольку подъем и спад импульсной волны обычно эквивалентен действию высоких частот.

Для силовых конденсаторов, работающих при частоте 50 *гц*, индуктивность необходимо учитывать при разработке мероприятий по демпфированию колебательных процессов при включении конденсаторных батарей. Для конденсато-

ров наличие даже малой индуктивности опасно в том отношении, что, когда частота приближается к резонансной, происходит кажущееся увеличение емкости конденсатора

$$C_э = \frac{C}{1-(2\pi f)^2 LC} \; ф, \quad (1\text{-}63)$$

где $C_э$ — эффективная емкость, *ф*;
C — истинная емкость, *ф*;
f — частота, *гц*;
L — индуктивность конденсатора, *гн*.

В данном случае под величиной L подразумевается сумма индуктивности конденсатора и проводников, которыми он присоединен к схеме.

Особенно опасно наличие индуктивности в помехозащитных конденсаторах, служащих для отведения к земле токов высокочастотных помех. Эти конденсаторы включаются между землей и выводом устройства, в котором возникают высокочастотные колебания (помехи), мешающие радиоприему (устройства зажигания в автомобилях, коллекторы электромашин, контактная сеть электротранспорта и т. п). Помехозащитный конденсатор должен оказывать достаточно большое сопротивление токам низкой частоты или постоянному току и иметь возможно малое полное сопротивление при высоких частотах, чтобы быть шунтом малого сопротивления для высокочастотных токов. Следовательно, помехозащитный конденсатор может эффективно отводить к земле только такие токи, частота которых ниже его резонансной частоты, так как при более высоких частотах его сопротивление возрастает. При снижении индуктивности конденсатора повышается значение его $f_р$ и расширяется диапазон частот, которые он может подавлять.

При работе конденсатора в импульсном режиме (генераторы импульсных напряжений и токов, делители напряжения, линии формирования импульсов и т. п.) величина индуктивности влияет на форму импульса, а потому должна быть малой. В некоторых случаях (например, при исследовании физических процессов, протекающих в газовом разряде) от импульсных конденсаторов требуется разряд с частотой порядка нескольких мегагерц, что возможно только при малой индуктивности конденсаторной батареи.

Конденсаторы связи, используемые на линиях передачи высокого напряжения для подключения устройств высокочастотной релейной защиты и аппаратуры высокочастотной

связи, также должны иметь небольшую индуктивность, так как она может повлиять на форму высокочастотного сигнала, проходящего через конденсатор.

Следовательно, при конструировании перечисленных типов конденсаторов необходимо стремиться к получению минимального значения их индуктивности. Для этого необходимо:

1. Токоведущие части конденсатора по возможности располагать так, чтобы их магнитные поля взаимно компенсировались. С этой целью проводники с противоположным направлением токов нужно сближать, а проводники с одинаковым направлением токов — максимально удалять один от другого.

2. Форму и размеры токоведущих частей выбирать с таким расчетом, чтобы их длина была как можно меньше.

3. Материал металлических частей конденсатора выбирать с учетом магнитной проницаемости, применяя по возможности немагнитные материалы. При этом надо иметь в виду, что с ростом частоты магнитная проницаемость ферромагнитных материалов уменьшается за счет явления поверхностного эффекта, связанного с вытеснением электромагнитных процессов в поверхностные слои металла. При очень высоких частотах проницаемости ферромагнитных и немагнитных материалов отличаются незначительно.

Поскольку намотанный конденсатор может иметь значительное количество витков и напоминает собой катушку, ранее считали, что этот тип конденсатора должен обладать большой индуктивностью. В связи с этим в отличие от обычной намотки (со скрытой фольгой) был предложен специальный способ безындукционной намотки (с выступающей фольгой), при которой обкладки противоположного знака по всей длине намотанных лент выступают с противоположных торцов конденсаторной секции. Сминая и пропаивая фольгу, выступающую с торцов конденсатора, можно соединить накоротко все витки секции (рис. 14).

Рис. 14. Секция конденсатора с безындукционной намоткой:

1 — обкладки; 2 — диэлектрик.

Предполагалось, что таким способом можно свести индуктивность намотанного конденсатора к минимуму. Однако

позже было показано, что индуктивность такого же минимального порядка можно получить и при обычной намотке, если правильно расположить выводные контакты. Действительно, если представить намотанную секцию в развернутом виде и предположить, что выводы от обкладок расположены точно один против другого (рис. 15,*а*), то магнитные поля токов, протекающих по обкладкам как справа, так и слева от места расположения выводов, будут взаимно компенсироваться, а следовательно, индуктивность должна быть равна

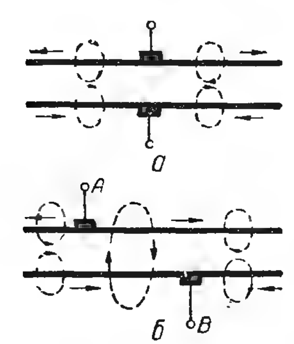


Рис. 15. Распределение токов и направления магнитных потоков в секции с обычной намоткой и вкладными контактами:

а — при совмещенных выводах; *б* — при смещенных выводах.

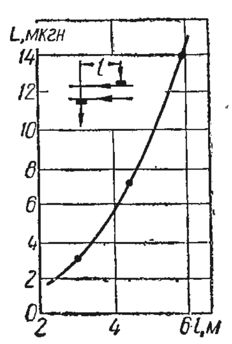


Рис. 16. Кривая зависимости индуктивности секции от величины смещения выводов (для секции силового конденсатора).

нулю. Если же выводы сдвинуты, то на участках обкладок между выводами токи имеют одинаковое направление, магнитные поля их складываются и индуктивность возрастает (рис. 15,*б*). Кривая зависимости индуктивности секции импульсного конденсатора на 50 *кв* емкостью 2,7 *мкф* от расстояния между выводами при их сильном смещении показана на рис. 16. При расстоянии 3 *м* индуктивность составляла 3,36 *мкгн*. При совмещении выводов она снизилась до 0,47 *мкгн*, т. е. более чем в 7 раз.

Для уменьшения индуктивности секций совмещенные выводы надо располагать с одного и того же торца. Так как направления токов в выводах одной и той же секции всегда противоположны, эти выводы следует максимально сближать, учитывая, однако, необходимость обеспечения достаточной электрической прочности изоляции между ними.

При совмещенных выводах уменьшение толщины диэлектрика между обкладками также снижает индуктивность.

При безындукционной намотке выводы от секции приходится располагать с противоположных ее торцов, вследствие чего может увеличиться общая индуктивность конденсатора в сравнении с использованием секций обычной намотки с совмещенными выводами, выпущенными с одного торца. Безындукционная намотка обеспечивает резкое снижение потерь в обкладках и улучшает отвод тепла от конденсаторной секции. Такую намотку широко используют при изготовлении помехозащитных конденсаторов. Конденсаторы такого типа при относительно больших емкостях иногда изготовляются в прямоугольных корпусах, причем один из выводов секции припаивается к дну корпуса, а второй — к токоведущей шине, проходящей через крышку. Эта шина включается в разрыв линии, которую предполагается освободить от высокочастотных помех. При этом длина соединительных проводников от обкладок секции к корпусу и к защищаемой линии сводится к предельному минимуму, а следовательно, резко падает индуктивность этих соединений.

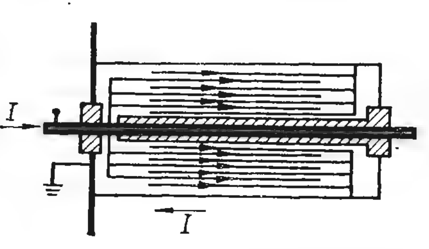


Рис. 17. Помехозащитный проходной конденсатор со стержнем, проходящим внутри конденсаторной секции.

Дальнейшим развитием этой конструкции является введение токоведущей шины (стержня) внутрь безындукционной секции конденсатора (рис. 17). В конденсаторах такой конструкции — проходных — обкладка секции, выступающая с одного торца, спаяна с токоведущим стержнем, а вторая обкладка — с корпусом конденсатора, который отводит к земле протекающие через него токи высокой частоты. Витки фольги, ближайшие к стержню и корпусу, должны принадлежать обкладке, соединенной с корпусом: при этом получается наиболее благоприятное распределение токов в конденсаторе, обеспечивающее минимальную индуктивность.

Компенсирующее влияние токов, протекающих по корпусу конденсатора, следует учитывать и при заземлении

конденсаторов высокого напряжения, используемых для генерирования импульсов. На схеме рис. 18 показано заземление путем присоединения заземляющего проводника к краю патрубка выводного изолятора. Если бы в этом случае заземляющий проводник был присоединен к нижней части корпуса вблизи от внутреннего места присоединения заземляемой системы обкладок, то индуктивность конденсатора заметно бы увеличилась.

Сложность геометрии конденсаторов затрудняет точный расчет их индуктивности. При этом расчете обычно выделяются отдельно элементы конденсатора, обладающие индуктивностью, вычисляется их индуктивность, составляется эквивалентная схема включения индуктивностей этих элементов и, наконец, вычисляется индуктивность этой эквивалентной схемы, т. е. конденсатора в целом. При этом обычно принимается, что индуктивность отдельных элементов не изменяется от того, что они собраны вместе, т. е. исключается взаимоиндукция между отдельными элементами конденсатора, что вносит погрешность в расчет. Погрешность может быть вызвана также и тем, что форма реальных элементов конструкции отличается от тех идеализированных форм, для которых имеются готовые формулы расчета индуктивностей. В связи с этим расчетные значения индуктивности конденсатора желательно проверять экспериментально.

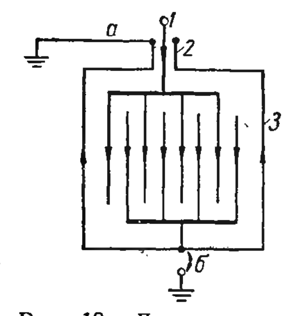


Рис. 18. Два варианта места заземления корпуса конденсатора:

а — при минимальной индуктивности; *б* — повышенной индуктивности; *1* — вывод конденсатора; *2* — патрубок изолятора; *3* — корпус.

Расчет индуктивности конденсаторных секций

Для вычисления индуктивности плоской секции с двумя обкладками или развернутой в плоскую ленту спирально намотанной секции можно применить формулу Гровера, которая соответствует индуктивности между двумя проводящими шинами прямоугольного сечения (рис. 19),

$$L = \frac{\mu_0 l}{\pi}\left[\frac{\pi}{3}(3\beta - \delta) - \frac{25}{12}\beta^2 - \frac{1}{12}\beta^4 - \frac{1}{12}\beta^2\delta^2(\alpha^4 \ln \alpha - \right.$$

$$-2\beta^4\ln\beta+\gamma^4\ln\gamma-2\delta^4\ln\delta)\Big]\ \textit{гн},\qquad(1\text{-}64)$$

где

$$\alpha=\frac{2d_ф+d}{b};\quad \beta=\frac{d_ф+d}{b};\quad \gamma=\frac{d}{b};\quad \delta=\frac{d_ф}{b};$$

d — толщина диэлектрика, *см*;
b — ширина электрода (обкладки), *см*;
$d_ф$ — толщина электрода, *см*;
l — длина электрода, *см*.

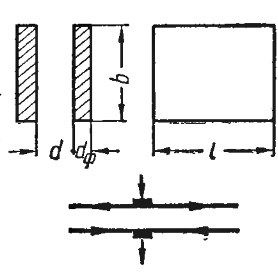


Рис. 19. К расчету индуктивности плоской секции с двумя обкладками.

Рис. 20. Эквивалентная схема замещения секции со сдвинутыми выводами.

Если размеры подставлены в сантиметрах, то $\mu_0=4\pi\times\times10^{-9}$ *гн/см*.

Для обычных конденсаторов $b\gg d_ф$ и $b\gg d$; тогда в формуле (1-64) можно пренебречь всеми ее членами, кроме первого,

$$L=\frac{\mu_0 l}{\pi}\left[\frac{\pi}{3}(3\beta-\delta)\right]=\frac{\mu_0 l}{3}\left(\frac{2d_ф+3d}{b}\right).\qquad(1\text{-}65)$$

Во многих случаях $3d\gg 2d_ф$, тогда

$$L=\frac{\mu_0 ld}{b}.\qquad(1\text{-}66)$$

Эти формулы соответствуют совмещению выводов от обеих обкладок, токи в обкладках протекают в противоположных направлениях.

Если один вывод смещен относительно другого по длине фольги, то упрощенная эквивалентная схема замещения секции имеет вид, показанный на рис. 20. На этой схеме: C_1 и L_1 — емкость и индуктивность левой (или правой)

части развернутой секции за пределами выводов, где токи в обкладках имеют противоположные направления; C_{AB} — емкость секции на участке между выводами A и B, равномерно распределенная по длине фольги (на схеме она разбита на две равные части по $\frac{C_{AB}}{2}$, которые в виде сосредоточенных емкостей включены в точках A и B); L_2 — индуктивность, создаваемая участком секции, где обкладки находятся между двумя смещенными выводами, в связи с чем токи в них направлены одинаково (см. рис. 15, *б*); L_3 — индуктивность выводного проводника от секции.

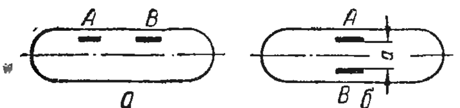


Рис. 21. К расчету индуктивности участков обкладок между сдвинутыми выводами:

а — выводы сдвинуты по длине обкладок в пределах ширины секции; *б* — выводы сдвинуты по длине обкладки на половину одного витка.

Индуктивность L_1 можно рассчитать по формуле (1-65). Вычисление индуктивности L_2 рассмотрено в работе Г. С. Кучинского и К. М. Иркаевой для следующих случаев.

Выводы сдвинуты по длине обкладок в пределах ширины секции (рис. 21, *а*):

$$L_2 = \frac{\mu_0 l_{AB}}{2\pi}\left(\ln\frac{2l_{AB}}{b} + \frac{1}{2}\right), \qquad (1\text{-}67)$$

где l_{AB} — длина обкладки между выводами A и B;
b — ширина обкладки.

Выводы сдвинуты по длине обкладки на половину одного витка (рис. 21, *б*). В этом случае значение индуктивности определяется геометрическими размерами петли, образуемой фольгой при ее намотке на половину оборота оправки, т. е. будет зависеть от толщины фольги $d_ф$, ширины b, длины петли l_{AB} и толщины всех предшествующих слоев a:

$$L_2 = \frac{\mu_0 l_{AB}}{3b}(2d_ф + 3a). \qquad (1\text{-}68)$$

Выводы сдвинуты на полную длину одного витка:

$$L_2 = \frac{\mu_0 S}{b}, \qquad (1\text{-}69)$$

где S — площадь поперечного сечения витка фольги.

Если выводы секции совмещены, то место их расположения по отношению к началу намотки мало влияет на величину индуктивности конденсаторной секции, как показали данные, приведенные на рис. 22, *а* для конденсаторной секции емкостью 1 *мкф* при толщине диэлектрика, равной 80 *мк*, и ширине фольги 280 *мм*. Значение L_2 колебалось в пределах $(0{,}6 \div 2{,}1)\,10^{-9}$ *гн* при погрешности измерения $(0{,}5 \div 1)\,10^{-9}$ *гн*.

Если выводы сдвинуты на половину витка, то по тем же данным, показанным на рис. 22, *б*, влияние места расположения выводов оказывается уже более заметным; общая индуктивность (включая индуктивность выводов), т. е. сумма L_1, L_2 и L_3, согласно рис. 20, по мере продвижения от начала намотки к концу возросла от $2{,}5 \cdot 10^{-9}$ до $16 \cdot 10^{-9}$ *гн*.

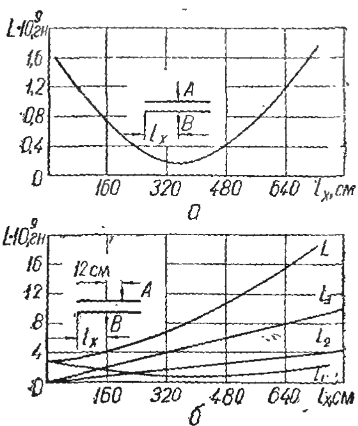


Рис. 22. Кривые зависимости индуктивности конденсаториой секции от расстояния между началом намотки и местом расположения ближайшего вывода:

а — оба вывода совмещены; *б* — выводы смещены иа 12 *см*; L_1 — индуктивность секции за вычетом участка обкладок между смещенными выводами; L_2 — индуктивность участка между смещенными выводами; L_3 — индуктивнссть выводных проводников; L — суммарная индуктивность секции.

Если выводы смещены в пределах ширины секции, то, по данным тех же авторов, в зависимости от расположения выводов индуктивность при тех же размерах может меняться в пределах от $1 \cdot 10^{-9}$ до $12 \cdot 10^{-9}$ *гн*.

Иногда применяют секции со скрытой фольгой, причем для уменьшения сопротивления обкладок устанавливают несколько пар выводов, равномерно располагая их по длине фольги. В этом случае для обеспечения достаточно надежной изоляции смещение между каждой парой выводов обычно дается равным половине витка. Как показывает кривая на рис. 22, *б*, индуктивность различных пар выводов, расположенных в разных участках фольги (при смещении выводов в каждой паре на полвитка), различна и к концу обкладок заметно возрастает. Так как индуктивность у основных обкладок меньше, чем у соответствующей пары выводов,

смещенной относительно начала секции, то все дополнительные пары выводов будут шунтированы основными обкладками и практически не будут участвовать в распределении тока. При этом весь ток будет вытесняться на первую пару выводов, обладающую наименьшей индуктивностью. В связи с этим индуктивность секции при использовании нескольких пар выводов изменяется мало.

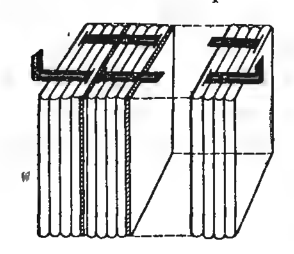


Рис. 23. Конструкция пакета секций конденсатора с малой индуктивностью.

Существенное уменьшение индуктивности секции возможно при ее делении на несколько подсекций меньшей емкости, наматываемых отдельно и соединяемых параллельно. На рис. 23 показан эскиз конструкции пакета секций бумажного конденсатора на 50 *кв* емкостью 0,1 *мкф*, состоящего из 10 последовательно соединенных групп секций, при четырех параллельно соединенных секциях по 0,25 *мкф* в каждой группе. Для такого пакета была получена индуктивность порядка $18 \cdot 10^{-9}$ *гн*.

Если плоская конденсаторная секция состоит из нескольких параллельно соединенных элементов (например, секция слюдяного конденсатора), то такую секцию по ее индуктивности можно считать эквивалентной проводнику прямоугольного сечения, имеющего те же размеры, что и секция

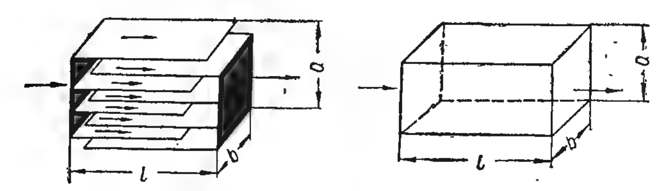


Рис. 24. К расчету индуктивности многопластинчатого плоского конденсатора.

(рис. 24). В этом случае для вычисления индуктивности можно воспользоваться формулой

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi}\left(\ln\frac{2l}{a+b} + 0,5 + 0,223\frac{a+b}{l}\right) \text{ гн}, \qquad (1\text{-}70)$$

где l — длина, b — ширина и a — толщина секции, *см*.

Аналогично для расчета индуктивности цилиндрической намотанной секции с выступающими обкладками (безындукционная намотка) можно воспользоваться формулой для вычисления индуктивности короткого проводника круглого сечения (рис. 25)

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi}\left(\ln\frac{4l}{D} - 1\right), \qquad (1\text{-}71)$$

где l — длина секции и D — ее диаметр.

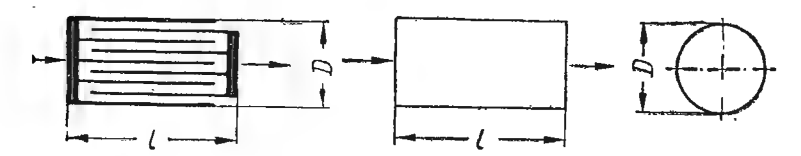


Рис. 25. К расчету индуктивности цилиндрического конденсатора с безындукционной намоткой.

Правильность формул (1-70) и (1-71) для расчета индуктивности конденсаторных секций в двух рассмотренных случаях была подтверждена экспериментальной проверкой.

Расчет индуктивности выводов конденсатора и его межсекционных соединений

Для расчета индуктивности выводов и внутренних соединений в конденсаторах могут быть применены имеющиеся в литературе формулы, соответствующие ряду токопроводящих конфигураций, которые встречаются в конструкциях конденсаторов или сходны с ними. При использовании в конденсаторе проводников круглого сечения применяются формулы, соответствующие одиночному прямому проводнику или двум параллельным проводникам круглого сечения (рис. 26, *а* и *б*).

Для одиночного проводника круглого сечения может быть использована формула (1-71).

Для двух параллельных проводников круглого сечения

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi}\left[\ln\frac{l + \sqrt{l^2 + r^2}}{l + \sqrt{l^2 + d^2}}\cdot\frac{d}{2} + \frac{\sqrt{l^2 + d^2} - \sqrt{l^2 + r^2}}{l} + \frac{1}{4} - \frac{d - r}{l}\right]. \qquad (1\text{-}72)$$

Если длина проводника много больше его радиуса и расстояния между осями проводников, т. е. если $l \gg r$ и $l \gg d$, формула упрощается

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi}\left(\ln\frac{d}{r} + \frac{1}{4}\right). \qquad (1\text{-}73)$$

При использовании в качестве выводов или межсекционных соединений конденсатора плоских шин прямоуголь-

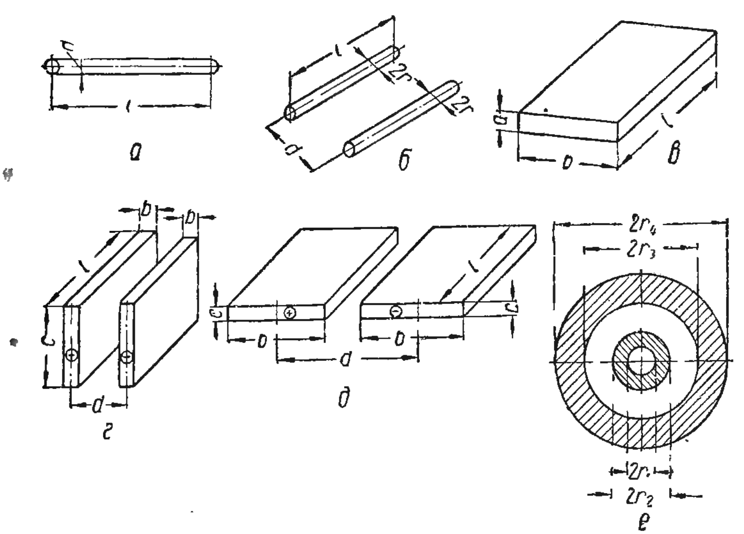


Рис. 26. К расчету индуктивности выводов конденсатора: *а* — одиночный проводник круглого сечения; *б* — два параллельных проводника круглого сечения; *в* — одиночная шина прямоугольного сечения; *г* — параллельные шины, сближенные широкими сторонами; *д* — две параллельные шины, сближенные узкими сторонами; *е* — коаксиальный кабельный вывод.

ного сечения или полосок металлической фольги, могут быть применены формулы, соответствующие конфигурациям на рис. 26 *в*, *г* и *д*.

Для одиночной шины прямоугольного сечения можно применить формулу (1-70).

Для двух параллельных шин прямоугольного сечения, сближенных широкими сторонами (при $c > b$),

$$L = \frac{\mu_0 l}{\pi}\left[\ln\frac{d}{b+c} + \frac{\gamma^2 - 1}{2\gamma^2}\ln(1+\gamma^2) + \frac{2}{\gamma}\operatorname{arctg}\gamma\right], \qquad (1\text{-}74)$$

где $\gamma = \frac{c}{d}$.

Для двух параллельных шин прямоугольного сечения, сближенных узкими сторонами (при $c < b$),

$$L = \frac{\mu_0 l}{\pi}\left[\ln\frac{d}{b+c} + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\beta}+1\right)^2 \ln(\beta+1) + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\beta}-1\right)^2 \ln(1-\beta)\right], \qquad (1\text{-}75)$$

где $\beta = \frac{b}{d}$.

При высоких частотах можно предполагать, что ток распределяется практически равномерно вдоль широкой стороны сечения каждой из шин и принять в формуле (1-74) $b = 0$, а в формуле (1-75) $c = 0$.

Если вывод конденсатора осуществлен отрезком коаксиального кабеля с полым внутренним проводником (рис. 26, *е*), то

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi}\left[\frac{r^2 - 3r_1^2}{2(r_2^2 - r_1^2)} + \frac{2r_1^4}{(r_2^2 - r_1^2)^2}\ln\frac{r_2}{r_1} + 2\ln\frac{r_3}{r_2} + \right.$$

$$\left. + \frac{2}{r_4^2 - r_3^2}\left(\frac{r_4^4}{r_4^2 - r_3^2}\ln\frac{r_4}{r_3} - \frac{3r_4^2 - r_3^2}{4}\right)\right]. \qquad (1\text{-}76)$$

Если внутренний проводник имеет сплошное сечение, т. е. $r_1 = 0$, то

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi}\left[\frac{1}{2} + 2\ln\frac{r_3}{r_2} + \frac{2}{r_4^2 - r_3^2}\left(\frac{r_4^4}{r_4^2 - r_3^2}\ln\frac{r_4}{r_3} - \frac{3r_4^2 - r_3^2}{4}\right)\right]. \qquad (1\text{-}77)$$

При высоких частотах можно принять, что весь ток будет вытеснен к наружной поверхности, т. е. $r_3 = r_4$, тогда

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi}\left(\frac{1}{2} + 2\ln\frac{r_3}{r_2}\right). \qquad (1\text{-}78)$$

При расчете индуктивности выводов от плоскопрессованных намотанных секций, имеющих вид полосок медной луженой фольги, выпущенных с одного торца секции, Г. С. Кучинский и К. М. Иркаева применяли следующие формулы:

а) при смещении выводов в пределах ширины секции (рис. 21, *а*) для индуктивности каждого из них — формулу (1-67), представляющую собой упрощенный вариант формулы (1-70) для проводника прямоугольного сечения, когда $a \ll b$ и $b < l$. При этом для формулы (1-67)

принималось, что l_{AB} — длина вывода, выступающая за пределы обкладок секции, b — ширина вывода;

б) при смещении выводов на половину витка и расположения их друг под другом (рис. 21, *б*) для индуктивности обоих выводов — формулу (1-64), соответствующую плоскому конденсатору с двумя параллельными обкладками. В этом случае: $d_ф$ — толщина вывода, l — длина вывода (за пределами обкладок конденсаторной секции), b — ширина вывода и a — расстояние между выводами.

Пример 1. Рассчитать суммарную индуктивность плоскопрессованной секции высоковольтного бумажного конденсатора при следующих данных: $C = 1$ *мкф*, толщина диэлектрика $d = 80$ *мк*, толщина фольги $d_ф = 10$ *мк*, ширина фольги $b = 280$ *мм*, ширина выводного контакта 10 *мм*, длина его 50 *мм*; контакты сдвинуты по длине фольги обкладок на 100 *мм* (в пределах ширины секции).

Принимаем, что индуктивность состоит из трех слагаемых: L_1 — индуктивность основной части секции с бифилярной намоткой; L_2 — индуктивность обкладок на длине, расположенной между сдвинутыми выводами, т. е. на участке, где токи в обкладках совпадают; L_3 — индуктивность выводов.

Для определения L_1 надо знать длину фольги в секции, которую определяют по формуле (1-46):

$$l = \frac{Cd}{0{,}177\varepsilon b} = \frac{1 \cdot 80}{0{,}177 \cdot 3{,}5 \cdot 28} = 4{,}6 \text{ м}.$$

Здесь для пропитанной бумаги (предположена неполярная пропитка и небольшая плотность бумаги) принято $\varepsilon = 3{,}5$. Длина фольги получена в *м*, поскольку d — в *мк*, b — в *см* и C — в *мкф*.

Зная длину фольги, вычитаем из нее часть длины между выводами: $460 - 10 = 450$ *см*. Находим индуктивность этой (бифилярной) части обкладок по формуле (1-65):

$$L_1 = \frac{4\pi \cdot 10^{-9} \cdot 450}{3 \cdot 28}(2 \cdot 10 \cdot 10^{-4} + 3 \cdot 80 \cdot 10^{-4}) = 1{,}8 \cdot 10^{-9} \text{ гн}.$$

Индуктивность части обкладок между выводами находим по формуле (1-67):

$$L_2 = \frac{4\pi \cdot 10^{-9} \cdot 10}{2\pi}\left(\frac{1}{0{,}434}\ln\frac{2 \cdot 10}{28} + 0{,}5\right) = 3 \cdot 10^{-9} \text{ гн}.$$

Индуктивность одного вывода находим по той же формуле (1-67). Для двух выводов получаем

$$L_3 = 2\,\frac{4\pi \cdot 10^{-9} \cdot 5}{2\pi}\left(\frac{1}{0{,}434}\ln\frac{2 \cdot 5}{1} + 0{,}5\right) = 56 \cdot 10^{-9} \text{ гн}.$$

Таким образом, $L = (1{,}8 + 3 + 56) \cdot 10^{-9} = 60{,}8 \cdot 10^{-9}$ *гн*, причем основная часть индуктивности приходится на долю выводов.

Пример 2. Определить индуктивность цилиндрического намотанного конденсатора с выступающей фольгой диаметром 15 *мм* и длиной 50 *мм*, имеющего осевые выводы, выполненные проводником диаметром 1 *мм* и длиной 40 *мм* (с каждой стороны).

Индуктивность тела конденсатора находим по формуле (1-71):

$$L_1 = \frac{4\pi \cdot 10^{-9} \cdot 5}{2\pi}\left(\frac{1}{0{,}434}\ln\frac{4{,}5}{1{,}5} - 1\right) = 16 \cdot 10^{-9}\ \text{гн};$$

по той же формуле иаходим индуктивность двух выводов

$$L_3 = \frac{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-9} \cdot 4}{2\pi}\left(\frac{1}{0{,}434}\ln\frac{4 \cdot 4}{0{,}1} - 1\right) = 65 \cdot 10^{-9}\ \text{гн}.$$

Суммарная индуктивность

$$L = (16 + 65)\,10^{-9} = 81 \cdot 10^{-9}\ \text{гн}.$$

И в этом случае выводные проводники обусловили большую часть общей индуктивности.

Приняв, что емкость конденсатора равна 0,5 *мкф*, найдем для него резонансную частоту

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{8{,}1 \cdot 10^{-8} \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-6}}} = 2{,}1 \cdot 10^{6}\ \text{гц} = 2{,}1\ \text{Мгц}.$$

Пример расчета индуктивности конденсатора высокого напряжения плоской конструкции, собранного в железном баке, дается в работе П. Н. Дашука.

§ 5. РАСЧЕТ ПОТЕРЬ В КОНДЕНСАТОРАХ

Активная мощность $P_а$, выделяемая в конденсаторе в виде тепла, определяется потерями в диэлектрике и потерями в металлических частях конденсатора:

$$P_а = P_д + P_м. \qquad (1\text{-}79)$$

При учете потерь в диэлектрике необходимо прежде всего вычислить потери в основном диэлектрике конденсатора. Если тангенс угла потерь основного диэлектрика составляет $\operatorname{tg}\delta_о$, емкость, определяемая основным диэлектриком, $C_о$ и к конденсатору приложено напряжение U частоты f, то

$$P_д = 2\pi f U^2 C_о \operatorname{tg}\delta_о, \qquad (1\text{-}80)$$

где $P_д$ — в *вт*, f — в *гц*, U — в *в* и $C_о$ — в *ф*.

Кроме потерь в основном диэлектрике есть потери и во вспомогательных диэлектриках (выводные изоляторы, заливочная масса, изоляция от корпуса, материал корпуса, если

последний изготовлен из электроизоляционного материала, пластмассовая опрессовка и т. д.). Величина этих добавочных потерь определяется соответствующей паразитной емкостью $C_п$, создаваемой электрическим полем рассеяния, которое проходит через вспомогательный диэлектрик, и тангенсом угла потерь диэлектрика $\operatorname{tg}\delta_п$:

$$P_{д\ доб} = 2\pi f U^2 C_п \operatorname{tg} \delta_п. \qquad (1\text{-}81)$$

Обычно величина $C_п$ относительно невелика в сравнении с основной емкостью конденсатора $C_о$ и теряемая в ней мощность мала, поэтому при расчете общих потерь в конденсаторах потери во вспомогательных диэлектриках можно не учитывать. Однако при изготовлении конденсаторов небольшой емкости из диэлектрика с малым $\operatorname{tg}\delta_о$ с использованием вспомогательных диэлектриков с большим $\operatorname{tg}\delta_п$ пренебрегать потерями $P_{д.\ доп}$ уже нельзя. В этом случае, используя выражения (1-80) и (1-81), получаем выражение для суммарных диэлектрических потерь в конденсаторе

$$P'_д = 2\pi f U^2 \left(C_о \operatorname{tg} \delta_о + \sum_{i=1}^{i=n} C_{п_i} \operatorname{tg} \delta_{п_i}\right), \qquad (1\text{-}82)$$

где под знаком суммы учитываются потери в различных видах вспомогательной изоляции. При расчете надо знать значения емкостей $C_п$, которые трудно точно рассчитать и проще определить экспериментально на макете конденсатора. В небольших конденсаторах значения $C_п$ обычно не превышают нескольких пикофарад, но в больших конденсаторах, в частности для емкости, обусловленной изоляцией от корпуса, могут достигать сотен и тысяч пикофарад.

Так как значение $C_о$ определяется только основным диэлектриком, т. е. равно фактической емкости конденсатора $C - C_п$, а обычно $C_п \ll C_о$, то можно принять $C_о = C$, т. е. полной емкости конденсатора.

Потери в металлических частях конденсатора определяются прежде всего потерями на нагрев обкладок и выводов. Если вывод соединен с обкладкой с помощью вкладного контакта, который не припаян или не приварен к обкладке, то могут появиться потери в переходном сопротивлении контакта между обкладкой и выводом; обычно этими потерями можно пренебречь. Они могут сказываться в тех случаях, когда после воздействия влажности или иной причины

переходное сопротивление возрастает вследствие появления окиси на металлических поверхностях в месте контакта.

Для электролитических конденсаторов понятие потери в металлических частях надо понимать условно, так как в таких конденсаторах одной из обкладок служит электролит; подсчитывая потери в обкладках, приходится учитывать потери в слое электролита. Этим объясняется высокое значение $\operatorname{tg}\delta$ электролитических конденсаторов.

Учитывая только потери в обкладках и выводах, получаем

$$P_{\text{м}} = I^2 (r_{\text{о}} + r_{\text{в}}) = I^2 r_{\text{м}}, \quad (1\text{-}83)$$

где $P_{\text{м}}$ — в *вт*, при I — в *а* и r — в *ом*.

Величину $r_{\text{м}}$ можно назвать общим сопротивлением металлических частей конденсатора.

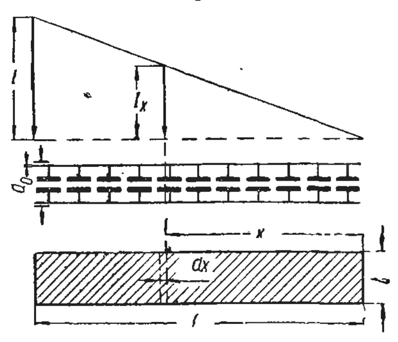


Рис. 27. К расчету потерь в обкладках при вкладных выводах, помещенных в начале или в конце намотки.

При расчете потерь в обкладках надо учитывать, что плотность тока в обкладках не одинакова по их длине; ток спадает от контакта вывода с обкладкой к концу обкладки. Рассмотрим плоский конденсатор, полученный разверткой намотанного конденсатора с вкладными контактами, поставленными в самом конце намотки; шириной контакта пренебрегаем. Обозначим длину обкладки l *см*, ширину b *см* и толщину d_0 *см* (рис. 27). Удельное сопротивление материала обкладки ρ *ом·см*, полный ток, потребляемый конденсатором, I *а*. Если в начале обкладки ток равен I, то к концу обкладки он спадает до нуля (рис. 27, вверху). На расстоянии x от конца обкладки выделим элемент обкладки длиной dx, в котором значение тока будет I_x. Мощность, рассеиваемая в этом элементе,

$$dP = I_x^2 \rho \frac{dx}{bd_0}. \quad (1\text{-}84)$$

Значение тока I_x будет меньше полного тока I во столько раз, во сколько x меньше l, т. е.

$$I_x = I \frac{x}{l}. \quad (1\text{-}85)$$

Подставляя значение I_x в формулу (1-84), получим

$$dP = I^2 \frac{\rho}{l^2 b d_o} x^2\, dx. \tag{1-86}$$

Для нахождения полных потерь в обеих обкладках надо взять интеграл от выражения (1-86) в пределах от нуля до l и удвоить полученное значение:

$$P_o = 2I^2 \frac{\rho}{l^2 b d_o} \int_0^l x^2\, dx = \frac{2}{3} I^2 \rho \frac{l}{b d_o}. \tag{1-87}$$

Если обозначить $P_o = I^2 r_o$, где под r_o понимать приведенное значение сопротивления обкладок, учитывающее неравномерность распределения плотности тока по длине обкладки, то используя выражение (1-87), можно написать

$$r_o = \frac{2}{3} \rho \frac{l}{b d_o}. \tag{1-88}$$

Таким образом, когда ток вводится в самом начале обкладок, приведенное сопротивление их, учитывающее спадание тока по длине обкладки, будет в 3 раза меньше, чем величина сопротивления, рассчитанная в предположении, что вся длина обкладки обтекается полным током I. Если поставить выводы в середине длины обкладки (рис. 28, *а*), то в начале каждой половины длины обкладки ток будет иметь половинное значение, которое спадает до нуля к концу этой половины обкладки. Учитывая эти соображения, получаем

$$r_o = \frac{1}{6} \rho \frac{l}{b d_o}. \tag{1-89}$$

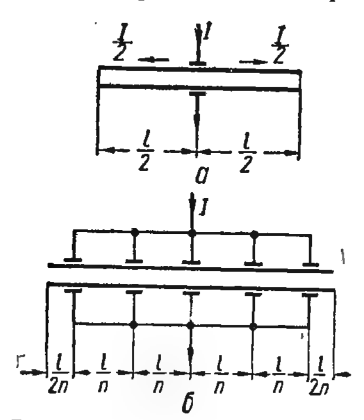


Рис. 28. Снижение потерь рациональным размещением выводов:
а — одна пара выводов в середине длины обкладок; *б* — несколько пар выводов.

Таким образом, при установке выводов в середине обкладки приведенное значение сопротивления обкладок, а следовательно, и потери в них P_o снижаются в 4 раза.

Еще больше снизить потери можно, применив несколько пар контактов, поставленных равномерно по длине обкладки (рис. 28, *б*).

Тогда

$$r_o = \frac{1}{6n^2} \rho \frac{l}{bd_o}, \tag{1-90}$$

где n — число пар контактов.

При использовании, например, 5 пар контактов потери в обкладках снижаются в 25 раз, в сравнении с одной парой в середине намотки, или в 100 раз, в сравнении с одной парой контактов в начале намотки. Однако это справедливо лишь при равномерном распределении тока между парами контактов, когда частота невелика и индуктивность обкладок и выводов еще не влияет на величину тока.

Резко снизить потери в обкладках можно при намотке с выступающей фольгой (безындукционной). В этом случае (рис. 29) длиной пути тока служит ширина обкладок b_o, а шириной пути тока — длина l. Учитывая это, по аналогии с формулой (1-88) получаем

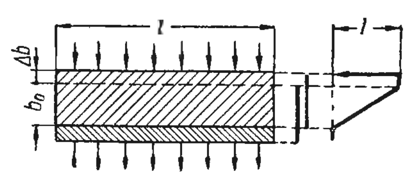


Рис. 29. К расчету потерь при безындукционной намотке (со сдвинутой фольгой).

$$r_o = \frac{2}{3} \cdot \frac{\rho b_o}{l d_o}. \tag{1-91}$$

Величина r_o в данном случае уменьшается в отношении $\left(\frac{l}{b}\right)^2$, по сравнению с намоткой со скрытой фольгой и одной парой контактов в начале намотки. Отношение $\frac{l}{b}$ в обычных намотанных конденсаторах большой емкости может быть порядка 100; при этом потери в обкладках при переходе от намотки со скрытой фольгой к намотке с выступающей фольгой могут быть снижены в 10 000 раз.

Формула (1-91) не учитывает закраину фольги Δb, в которой ток имеет постоянное значение. Уточненная формула имеет вид

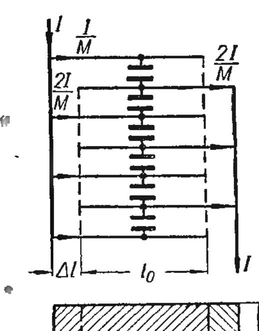
$$r_o = 2\rho \frac{\Delta b + \frac{b_o}{3}}{l d_o}. \tag{1-92}$$

Для намотанных металлизованных конденсаторов (металлобумажных или пленочных) можно применять формулу (1-92). Поскольку в этом случае трудно определить толщину

слоя металла и его удельное сопротивление, удобнее использовать при расчетах значение $r_{сл}$ в омах, рассчитанное на единицу поверхности. В этом случае

$$r_o = 2r_{сл}\frac{\Delta b + \frac{b_o}{3}}{l}. \qquad (1\text{-}93)$$

Для плоского многопластинчатого конденсатора (рис. 30), например для слюдяного конденсатора с числом элементов M, активной длиной обкладок l_o и шириной закраины по длине Δl, при ширине обкладок b и толщине d_o, r_o можно вычислить по формуле (1-88) с учетом следующих замечаний.



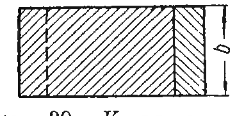


Рис. 30. К расчету потерь в многопластинчатом конденсаторе.

Конденсатор состоит из M параллельно соединенных емкостей, на каждую из которых приходится $\frac{1}{M}$ полного тока конденсатора I. По каждой из крайних обкладок ток подводится только к одной из элементарных емкостей; таких обкладок будет две. По каждой из остальных $M-1$ обкладок должен подводиться ток к двум элементарным емкостям, т. е. в обкладку будет входить ток $2\frac{I}{M}$. В каждой обкладке ток проходит элемент длины Δl, не изменяясь по величине, а затем на длине l_o спадает до нуля. Учитывая эти соображения, запишем выражение для полных потерь в обкладках многопластинчатого конденсатора

$$P_o = \left[2\left(\frac{I}{M}\right)^2 + (M-1)\left(\frac{2I}{M}\right)^2\right]\left(\Delta l + \frac{l_o}{3}\right)\frac{\rho}{bd_o} =$$

$$= I^2\frac{4M-10}{M^2}\rho\frac{\Delta l + \frac{l_o}{3}}{bd_o}.$$

Поделив обе части полученного уравнения на I^2 и вынеся за скобку $\frac{2}{3}$, получим выражение для приведенного значения сопротивления обкладок

$$r_o = \frac{2}{3}\cdot\frac{2M-5}{M^2}\rho\frac{l_o + 3\Delta l}{bd_o}. \qquad (1\text{-}94)$$

Для цилиндрического конденсатора (рис. 31), например трубчатого керамического конденсатора, используя приведенные выше соображения и выразив ширину обкладки как среднюю длину окружности ($D_{\text{ср}}$ — среднее значение диаметра конденсатора), получим

$$r_{\text{о}} = \frac{2}{3} \rho \frac{l_{\text{о}} + 3\Delta l}{\pi D_{\text{ср}} d_{\text{о}}}. \tag{1-95}$$

Если конденсатор имеет вид плоского диска, например керамический дисковый конденсатор (рис. 32), причем подвод тока осуществляется в центре с помощью проводника радиусом r_1, а обкладка представляет собой

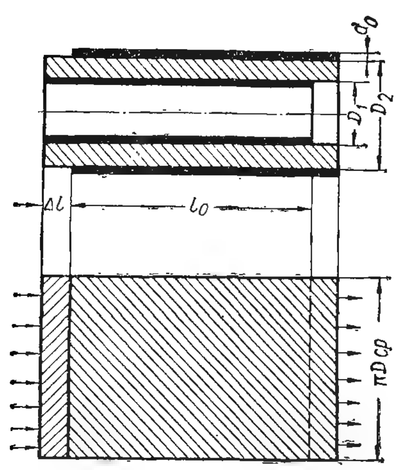


Рис. 31. К расчету потерь в цилиндрическом конденсаторе.

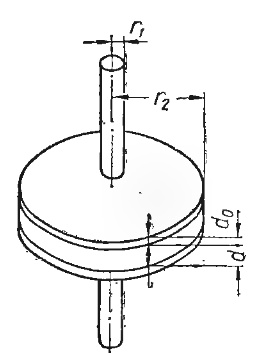


Рис. 32. К расчету потерь в дисковом конденсаторе с подводом тока в центре обкладки.

круг радиусом r_2, то сопротивление обкладок можно вычислить по формуле, предложенной Л. З. Гоголицыным,

$$r_{\text{о}} = \frac{\rho}{2\pi d_{\text{о}}} \left[\left(1 + \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}\right)^2 \ln \frac{r^2}{r_1} + \frac{r_1^2 - 3r_2^2}{4(r_2^2 - r_1^2)^2} \right], \tag{1-96}$$

где $d_{\text{о}}$ — толщина обкладки.

В сухом намотанном электролитическом конденсаторе сопротивление обкладок определяется сопротивлением волокнистой прокладки, пропитанной электролитом (рис. 33). Если длина анода l, ширина b и толщина прокладки, про-

питанной электролитом, $d_{пр}$ (размеры в *см*), то при удельном сопротивлении электролита $\rho_{эл}$ (*ом см*) и коэффициенте проницаемости прокладки φ (учитывающем увеличение сопротивления электролита при его впитывании в прокладку) получаем значение сопротивления обкладок

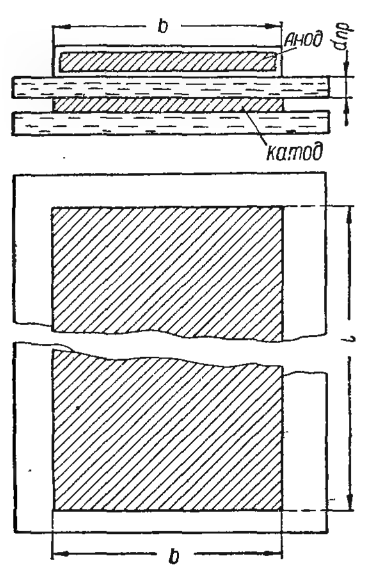


Рис. 33. К расчету потерь в электролитическом конденсаторе.

$$r_о = \varphi \rho_{эл} \frac{d_{пр}}{lb}. \qquad (1\text{-}97)$$

В данном случае путь тока равен толщине прокладки, так как благодаря использованию катодной фольги ток подводится к прокладке по всей ее поверхности.

Рассмотрим примеры расчета сопротивления обкладок.

Пример 1. Вычислить сопротивление обкладки намотанного конденсатора при длине фольги 5 *м*, ширине 50 *мм* и толщине 5 *мк*; фольга — алюминиевая ($\rho \approx 3$ *мком · см*). Намотка — со скрытой фольгой, контакты вложены в середине намотки.

Используем формулу (1-89):

$$r_о = \frac{1}{6} \cdot 3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{5 \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}1 \text{ ом}.$$

Пример 2. Вычислить сопротивление обкладки аналогичного конденсатора, но при намотке с выступающей фольгой, полагая, что активная ширина 50 *мм* и величина закраины 3 *мм*; длина и толщина обкладки те же, что в примере 1.

Используем формулу (1-92):

$$r_о = 2 \cdot 8 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0{,}3 - \frac{5}{3}}{5 \cdot 10^2 \cdot 5 \cdot 10^{-4}} = 4{,}7 \cdot 10^{-5} \text{ ом}.$$

Сопротивление обкладок при переходе к намотке с выступающей фольгой по сравнению с предыдущим примером снизилось примерно в 2000 раз.

Из приведенных примеров видно, что сопротивление обкладок относительно невелико, а потому при низкой частоте, когда конденсатор потребляет небольшой ток, потери в обкладках малы. С ростом частоты потери возрас-

тают, так как ток резко увеличивается. Так, при токе 10 *а* потери в обкладках в примере 1 ($r_o = 0{,}1$ *ом*) составляют 10 *вт*. При таком же токе в примере 2 потери составляют всего лишь 4,7 *мвт*, т. е. практически не ощутимы.

В связи с тем что обкладки в конденсаторах обычно имеют малую толщину (от 15—25 *мк* до малых долей микрона), влияние поверхностного эффекта на их сопротивление не учитывается.

Потери в выводах конденсатора определяются сопротивлением выводных проводников, которое легко подсчитать, если известно удельное сопротивление материала, длина вывода и его сечение,

$$r_{\text{выв}} = \rho \frac{l}{S} \text{ ом}. \tag{1-98}$$

Длина l — в *см*, площадь сечения S — в *см²* и ρ — в *ом · см*.

Если конденсатор имеет два изолированных вывода, то сопротивление, вычисленное по формуле (1-98), надо удвоить.

Для выводного проводника круглого сечения с диаметром D

$$r_{\text{выв}} = \rho \frac{4l}{\pi D^2}. \tag{1-99}$$

При высоких частотах сопротивление вывода возрастает за счет поверхностного эффекта, вызывающего неравномерное распределение плотности тока по сечению проводника вследствие вытеснения тока к поверхности. Глубина проникновения тока в металл, считая от его поверхности, характеризуется величиной Δ, определяющей расстояние от поверхности, на котором амплитуда тока убывает в e раз,

$$\Delta = k \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}, \tag{1-100}$$

где ρ — удельное сопротивление металла;

μ — магнитная проницаемость;

f — частота;

k — постоянный коэффициент.

При расчетах сопротивления проводников на высокой частоте за эффективную площадь сечения можно принимать произведение $\Delta\psi$, где ψ — периметр проводника.

Для круглых проводников было предложено учитывать возрастание сопротивления при высоких частотах путем

умножения $r_{выв}$ на поправочный коэффициент $F(\alpha)$. Для немагнитного материала

$$\alpha = 0{,}1407D\sqrt{\frac{f}{\rho}}, \qquad (1\text{-}101)$$

где D — диаметр, *см*;

f — частота, *гц*;

ρ — удельное сопротивление, *мком·см*.

Формулу (1-101) можно представить иначе:

$$\alpha = kD\sqrt{f}. \qquad (1\text{-}102)$$

Коэффициент k для меди равен 0,106, для серебра — 0,111 и для алюминия — 0,0843.

Значения $F(\alpha)$ при разных значениях α:

α	Менее 0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
$F(\alpha)$	1,0	1,01	1,03	1,08	1,18	1,30

При $\alpha > 3{,}0$ величину $F(\alpha)$ можно найти по приближенной формуле

$$F(\alpha) \approx \frac{\sqrt{2}\,\alpha + 1}{4}. \qquad (1\text{-}103)$$

Полные потери в конденсаторе

$$P_а = P_д + P_м = 2\pi f U^2 \left(C \operatorname{tg}\delta_о + \sum_{i=1}^{i=n} C_{пi} \operatorname{tg}\delta_{пi}\right) + I^2 r_м. \qquad (1\text{-}104)$$

Здесь $r_м = r_о + r_{выв}$, значение $C_о$, входившее в формулу (1-82), заменено значением C, т. е. полной емкостью между выводами конденсатора.

Разделив выражение, стоящее в скобках, на C, получим

$$\operatorname{tg}\delta_о + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{C_{пi}}{C} \operatorname{tg}\delta_{пi} = \operatorname{tg}\delta_д. \qquad (1\text{-}105)$$

Это выражение представляет собой составляющую тангенса общих потерь конденсатора, соответствующую только диэлектрическим потерям (в основном во вспомогательных диэлектриках).

Подставив в последний член выражения (1-104) значение тока, выраженное через напряжение, частоту и емкость, получим

$$I^2 r_м = 4\pi^2 U^2 f^2 C^2 r_м = 2\pi f U^2 C\, 2\pi f C r_м = 2\pi f U^2 C \operatorname{tg}\delta_м. \qquad (1\text{-}106)$$

Здесь $\operatorname{tg}\delta_м = 2\pi f C r_м$ представляет собой составляющую тангенса общих потерь конденсатора, соответствующую только потерям в металлических частях конденсатора (в обкладках и выводах). После преобразований выражение (1-104) имеет следующий вид:

$$P_a = 2\pi f U^2 C \operatorname{tg}\delta_д + 2\pi f U^2 C \operatorname{tg}\delta_м = 2\pi f U^2 C (\operatorname{tg}\delta_д + \operatorname{tg}\delta_м). \quad (1\text{-}107)$$

Обозначая $\operatorname{tg}\delta = \operatorname{tg}\delta_д + \operatorname{tg}\delta_м$, где δ — есть общий угол потерь конденсатора, учитывающий все потери в последнем, получаем:

$$P_а = 2\pi f U^2 C \operatorname{tg}\delta, \quad (1\text{-}108)$$

где $P_а$ — в *вт*, f — в *гц*, U — в *в* и C — в *ф*.

Если рассчитывается конденсатор определенного типа, аналогичного уже выпускавшимся на производстве с нормированным значением $\operatorname{tg}\delta$, то потери по их составляющим элементам можно не вычислять, а сразу найти общие потери по формуле (1-108), используя в ней нормированное значение $\operatorname{tg}\delta$. При этом надо брать наибольшее допускаемое нормами значение, соответствующее верхнему пределу температуры, для которой ведется расчет.

Значения $\operatorname{tg}\delta$, допускаемые отечественными ГОСТ или ТУ для некоторых типов конденсаторов с твердым диэлектриком, приведены в табл. 2.

Следует отметить, что формула (1-108) получена для синусоидального напряжения. Если кривая напряжения отличается от синусоидальной, т. е., кроме основной синусоиды с частотой f_1, содержит также синусоиды высших частот (высшие гармоники), то величина $P_а$ может заметно возрасти. В этом случае общие потери конденсатора представляют собой сумму потерь от каждой отдельной гармоники.

Для k-й гармоники с частотой f_k (угловая частота $\omega_k = 2\pi f_k = 2\pi k f_1 = k\omega_1$) значение потерь, вызываемых ею в конденсаторе,

$$P_{ak} = U_k^2 \omega_k C \operatorname{tg}\delta_k = k U_k^2 \omega_1 \operatorname{tg}\delta_k.$$

Здесь взято значение $\operatorname{tg}\delta_k$, так как угол потерь зависит от частоты.

Таблица 2

Значения $\operatorname{tg}\delta$ конденсаторов с твердым диэлектриком, допускаемые отечественными нормами

Тип конденсатора	Максимально допустимое значение $\operatorname{tg}\delta$		Максимальная температура, °C	Частота
	при 20° C	при $t_{макс}$		
Стеклоэмалевый	0,0015	0,0018	80	1 *Мгц*
Слюдяной, опрессованный типа КСО:				
емкость 200 *пф* и выше	0,0010	0,0020	70	1 *Мгц*
емкость 50 *пф*	0,0020	0,0040	70	1 *Мгц*
Керамический высокочастотный	0,0012	0,0018	80	1 *Мгц*
Сегнетокерамический	0,0100	0,0200	80	1 *кгц*
Бумажный типа КБГ	0,0100	—	70	50 *гц* — 1 *кгц*
Металлобумажный типа МБГ	0,0150	—	70	50 *гц* — 1 *кгц*
Бумажно-масляный силовой	0,0040	0,0040	65	50 *гц*
Полистирольный	0,0010	0,0015	60	1 *Мгц*
Фторопластовый	0,0010	0,0015	200	1 *Мгц*
Электролитический типа КЭ-М:				
напряжение 150 *в* и выше	0,1000	—	60	50*гц*
напряжение ниже 150 *в*	0,1500	—	60	50*гц*

Суммарные потери от n гармоник

$$P_a = \sum_{k=1}^{k=n} P_{ak} = \omega_1 C \sum_{k=1}^{k=n} kU_k^2 \operatorname{tg}\delta_k = \eta\omega_1 CU^2 \operatorname{tg}\delta_1, \quad (1\text{-}109)$$

где η — коэффициент возрастания потерь за счет наличия высших гармоник;

U — действующее значение несинусоидального напряжения, которое равняется корню квадратному из суммы квадратов напряжений всех гармонических составляющих:

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \ldots + U_n^2}. \quad (1\text{-}110)$$

Значение коэффициента η можно вычислить по формуле

$$\eta = \frac{\sum\limits_{i=1}^{i=n} kU_k^2 \operatorname{tg}\delta_k}{U^2 \operatorname{tg}\delta_1} = \sum_{i=1}^{i=n} ka_k^2 b_k, \quad (1\text{-}111)$$

где $$a_k = \frac{U_k}{U} \quad \text{и} \quad b_k = \frac{\operatorname{tg} \delta_k}{\operatorname{tg} \delta_1}.$$

Если в рассматриваемой области частот угол потерь мало зависит от частоты, то можно положить $b_k = 1$ и вычислить значение η как сумму членов ka_k^2, т. е. воспользоваться формулой

$$\eta = \frac{U_1^2 + \ldots + kU_k^2 + \ldots + nU_n^2}{U_1^2 + \ldots + U_k^2 + \ldots + U_n^2}. \qquad \text{(1-112)}$$

Для вычисления η заданную кривую напряжения раскладывают в ряд Фурье и находят напряжения отдельных гармоник. Гармониками с очень малыми напряжениями можно пренебрегать.

Пример. Вычислить η для кривой напряжения, показанной на рис. 34, *а*. При разложении этой кривой были получены: 1-я гармоника — 100%, 3-я — 28,5% и 5-я — 5,0% (указаны относительные значения напряжения). При изменении частоты в пределах от 50 до $5 \cdot 50 = 250$ *гц* $\operatorname{tg} \delta$ для бумажного конденсатора (рассматриваемого в данном случае) меняется незначительно и можно принять $b_k = 1$, т. е. использовать формулу (1-112). Окончательно получим

$$\eta = \frac{1{,}0^2 - 3 \cdot 0{,}285^2 - 5 \cdot 0{,}05^2}{1{,}0^2 - 0{,}285^2 - 0{,}05^2} = 1{,}16.$$

Таблица 3

Результаты вычисления η для сильно искаженной кривой (рис. 34, *б*)

k	U_k	U_k^2	kU_k^2
1	1,0000	1,0000	1,0000
3	0,0305	0,0093	0,0279
5	0,1650	0,0272	0,1360
7	0,2270	0,0515	0,3605
11	0,2950	0,0871	0,9600
13	0,2740	0,0750	0,9750
17	0,2830	0,0802	1,3650
19	0,2500	0,0625	1,1900
		1,3928	6,0144

$$\eta = \frac{6{,}0144}{1{,}3928} = 4{,}33$$

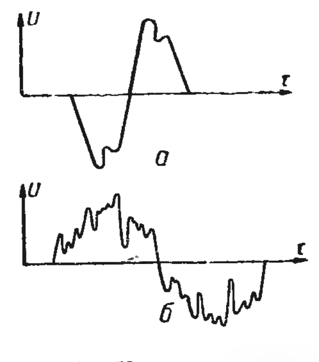


Рис. 34. Искажение кривых напряжений при наличии высших гармоник: *а* — 3-й и 5-й; *б* — до 17—19-й.

Таким образом, в данном случае потери увеличиваются за счет искажения формы кривой напряжения только на 16%. При более сильных искажениях, особенно при наличии более высоких гармоник

(9-я, 11-я и т. д.), величина η может быть много больше и доходить до значений $\eta \approx 3 \div 5$ и даже выше.

В качестве примера приведем расчет коэффициента η для кривой, форма которой показана на рис. 34, *б*. Значения напряжений высших гармоник (по отношению к 1-й гармонике, принятой за единицу), а также результаты вычислений приведены в табл. 3.

Непосредственное измерение потерь в конденсаторе, к которому было приложено это сильно искаженное напряжение, проведенное А. К. Герциком и В. П. Матвеевой с помощью калориметрического метода, позволило найти экспериментальное значение η, которое оказалось равным 4,05, т. е. достаточно близким к расчетному, указанному в табл. 3.

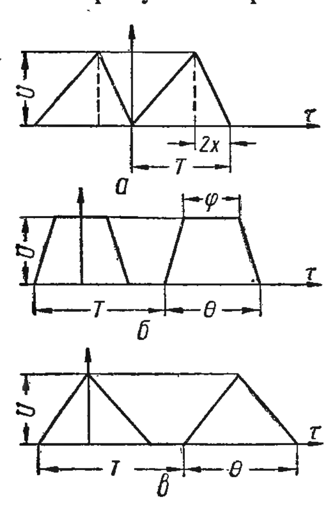


Рис. 35. К расчету потерь при различных формах импульсного напряжения:

а — пилообразной; *б* — трапецеидальной; *в* — треугольной.

Вопрос о потерях в конденсаторе при воздействии импульсных напряжений был рассмотрен в работе Пейссу, который дает ряд расчетных формул для вычисления активной мощности конденсатора при некоторых типичных формах импульсного напряжения. Для пилообразных импульсов, показанных на рис. 35, *а*, при амплитуде напряжений U и значениях T и x в соответствии с рисунком, имеем

$$P_{\text{а}} = \frac{U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta}{8} \cdot \frac{0{,}049}{\xi^2}, \tag{1-113}$$

где $\xi = \frac{2x}{T}$.

Для трапецеидальных импульсов (рис. 35, *б*)

$$P_{\text{а}} = \frac{U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta}{8} \cdot \frac{0{,}78}{\alpha^2 (1 - r)^2}, \tag{1-114}$$

где $\alpha = \frac{\theta}{T}$ и $r = \frac{\varphi}{\theta}$.

Для треугольных импульсов (рис. 35, *в*) можно применять формулу

$$P_{\text{а}} = \frac{U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta}{8} \cdot \frac{0{,}786}{\alpha^2}, \tag{1-115}$$

где α имеет то же значение, что и в предыдущей формуле.

Значения $\mathrm{tg}\,\delta$ для подстановки в эти формулы надо выбирать в соответствии с угловой частотой следования импульсов ω. Формулы (1-114) и (1-115) дают предельное значение мощности, рассеиваемой при данной форме импульсов (практически наблюдаемые значения будут несколько ниже). Эти формулы получены в предположении, что угол потерь не зависит от частоты в тех пределах, которые соответствуют высшим гармоникам, учитываемым при расчете.

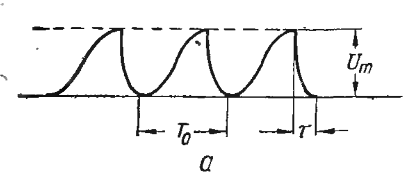
Для прямоугольных импульсов при разложении в ряд Фурье получается ряд такого вида, сумма членов которого стремится к бесконечности при неограниченном увеличении числа членов ряда. Следовательно, при строго прямоугольной форме импульса потери можно считать в конденсаторе бесконечно большими. Практически строго прямоугольная форма импульса не получается и его можно рассматривать как трапецеидальный, применяя для расчета потерь в конденсаторе формулу (1-114). Трапеция будет тем ближе к прямоугольнику, чем больше отношение φ к θ, т. е. чем больше величина r (рис. 35, *б*). В пределе при величине $r = 1$ согласно формуле (1-114) получаем $P_а = \infty$.

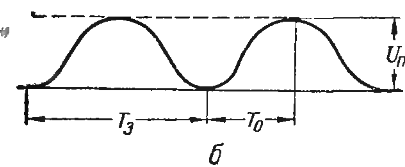
Обычно трапецеидальные или треугольные импульсы, показанные на рис. 35, имеют не острые, а закругленные углы, что и дает снижение фактических потерь в сравнении с расчетными.

Вопрос о вычислении потерь в конденсаторах при импульсном режиме рассмотрен также в работе Л. З. Гоголицына. Он предлагает рассматривать действие одиночных зарядов и разрядов, разделенных длительными паузами, как действие непрерывной последовательности таких зарядов и разрядов, учитывая скважность между ними при вычислении величины потерь.

Если последовательность импульсов состоит из длительных зарядов и кратковременных разрядов, то ее можно представить в виде двух самостоятельных последовательностей, составленных из процессов одинаковой длительности. К каждой из таких последовательностей можно применить разложение в ряд Фурье, получив быстросходящиеся ряды, позволяющие легко вычислить потери. При этом каждая последовательность одних только зарядов или одних только разрядов должна заменяться непрерывным чередованием зарядов и разрядов, одинаковых по длительности.

Это поясняется рис. 36. Кривая *а*, полученная чередованием длительного заряда (продолжительность $T_0 - \tau$]) и кратковременного разряда (продолжительность τ) заменяется кривыми *б* и *в*; кривая *б* представляет собой чередование длительных зарядов и длительных разрядов, а кривая *в* — чередование кратковременных зарядов и кратковременных разрядов. Величина tgδ, используемая при расчете, выбирается в соответствии с частотой следования импульсов. Полученное значение потерь для учета скважности умножается на отношение времени импульса к величине промежутка времени между импульсами. При этом учитываются в основном потери в диэлектрике конденсатора.





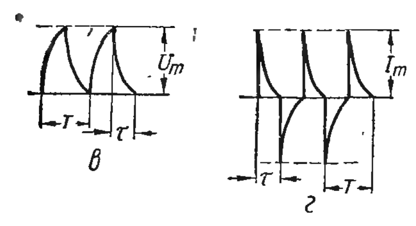


Рис. 36. К расчету потерь по методу Гоголицына:

а — длительный заряд и кратковременный разряд; *б* — длительный заряд и длительный разряд; *в* — кратковременный заряд и кратковременный разряд; *г* — кривая изменения тока в импульсном конденсаторе.

В импульсных конденсаторах высокого напряжения, формирующих кратковременные импульсы большой мощности, проходят большие импульсные токи, которые, несмотря на их кратковременность, могут дать заметное выделение тепла в конденсаторе. Кривая изменения тока в импульсном конденсаторе приведена на рис. 36, *г*.

Для вычисления потерь в обкладках, обусловленных импульсными токами, Л. З. Гоголицын предлагает формулу

$$P_o = \frac{r_o}{q} \sum_{k=1}^{k=\infty} I_k^2, \qquad (1\text{-}116)$$

где q — скважность;

r_o — приведенное сопротивление обкладок (вычисляемое по приведенным выше формулам);

I_k — действующее значение тока для k-й гармоники, полученное при разложении в ряд Фурье кривой тока.

Приближенный метод расчета потерь в конденсаторах, применяемых в искусственных линиях формирования импульсов, предложен Э. Жабоклицким. Он предлагает учитывать только диэлектрические потери, считая, что при правильной конструкции конденсатора потери в обкладках на джоулев эффект и на вибрацию должны быть сведены к минимуму. При заданной форме кривой импульса, показанной на рис. 37, предлагается расчетная формула, рас-

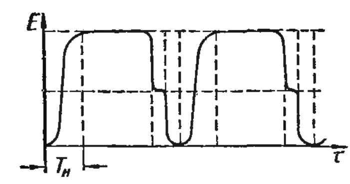


Рис. 37. Форма кривой напряжения на конденсаторе в линии формирования.

Рис. 38. Схема линии формирования импульсов из пяти ячеек.

сматривающая выделяемую в конденсаторе мощность как сумму мощностей, выделяемых в процессе заряда и при разряде

$$P_a = 2{,}8 \cdot 10^{-7} f V \varepsilon^2 E^2 (\operatorname{tg} \delta_1 + \operatorname{tg} \delta_2), \qquad (1\text{-}117)$$

где V — объем диэлектрика в конденсаторе, *см*³;

E — напряженность поля, *кв/см*;

ε — диэлектрическая проницаемость диэлектрика;

f — частота следования импульсов (число импульсов в *сек*);

$\operatorname{tg} \delta_1$ выбирается в соответствии с частотой f_1, эквивалентной потерям при заряде, а $\operatorname{tg} \delta_2$ — в соответствии с частотой f_2, эквивалентной потерям при разряде.

Частоты подсчитываются по формулам

$$f_1 = \frac{1}{2T_н} \text{ и } f_2 = \frac{n}{2T_ш},$$

где $T_н$ — время нарастания напряжения в начале образования импульса;

$T_ш$ — ширина генерируемого импульса;

n — число единичных конденсаторов, образующих ячейки линии формирования импульсов (рис. 38).

Следует отметить, что при общем рассмотрении вопроса о подсчете потерь в конденсаторах не учитывался ряд потерь, которые могут быть у отдельных типов конденсаторов. Так, в конденсаторах с обкладками из фольги при недостаточном сжатии секций в пакете могут проявиться потери на вибрацию обкладок. В конденсаторах с металлизированными обкладками в виде тонких слоев металла, нанесенных непосредственно на поверхность диэлектрика, потерь на вибрацию не должно быть, но зато могут проявиться потери, обусловленные эффектом «мерцания», связанным с недостатками процесса металлизации и т. п.

В связи с этим можно ожидать, что при расчете потерь будут получаться данные, отличающиеся от действительных в сторону снижения. Поэтому результаты расчета желательно проверять непосредственным измерением потерь на макетах конденсаторов, изготовленных по расчетным данным.

§ 6. ОСНОВЫ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА КОНДЕНСАТОРОВ

Цель теплового расчета — определить температуру нагрева конденсатора в заданных условиях работы с тем, чтобы оценить правильность выбранных размеров конденсаторов с точки зрения обеспечения допустимых значений перегрева по отношению к температуре окружающей среды.

При расчете конденсатора на тепловой пробой, рассмотренном выше, определялось то предельное значение напряжения, при котором еще возможно равновесие между количеством тепла, выделяющимся внутри конденсатора, и количеством тепла, отводимым с его поверхности. Это равновесие устанавливается при некотором определенном значении температуры конденсатора, которое допустимо с точки зрения теории теплового пробоя, но может быть недопустимо большим как с точки зрения термического старения диэлектрика при длительном нагреве, так и с точки зрения допускаемых изменений электрических свойств конденсатора в зависимости от температуры и допустимого нагрева для других деталей аппаратуры, расположенных по соседству с конденсатором, и т. д.

Поэтому при тепловом расчете конденсатора приходится ориентироваться на некоторое значение температуры $t_{макс}$, установленное из тех или иных перечисленных выше соображений; при этом величина $t_{макс}$ может быть значительно ниже

того значения температуры, которое соответствует напряжению теплового пробоя.

Значение температуры $t_к$ на поверхности корпуса конденсатора при установившемся тепловом режиме можно найти, приравняв количество тепла (потери мощности), выделяемое в конденсаторе при его номинальной нагрузке, количеству тепла, отдаваемому с его поверхности в окружающую среду,

$$P_а = 2\pi f U_р^2 C \operatorname{tg} \delta = \alpha_т S_{охл} (t_к - t_о), \qquad (1\text{-}118)$$

откуда

$$t_к = \frac{2\pi f U_р^2 C \operatorname{tg}\delta}{\alpha_т S_{охл}} + t_о. \qquad (1\text{-}119)$$

Здесь f — в *гц*, $U_р$ — в *в*, C — в *ф*;

$\alpha_т$ — коэффициент теплоотдачи с поверхности конденсатора, *вт/см²·град*;

$S_{охл}$ — поверхность охлаждения, *см²*;

$t_о$ — температура окружающей среды, °C;

$t_к$ — установившаяся температура на поверхности конденсатора, °C.

При расчете подставляется $U_р$ — значение номинального рабочего напряжения при номинальной рабочей частоте f и верхний предел допускаемого значения емкости C (номинальное значение + верхний предел допуска по емкости). Под величиной $S_{охл}$ обычно понимают только поверхность боковых сторон корпуса, пренебрегая теплоотводом от дна и через крышку конденсатора.

Первый член правой части выражения (1-119) представляет собой значение перегрева на поверхности конденсатора по отношению к температуре окружающей среды:

$$\Delta t = t_к - t_о = \frac{2\pi f U_р^2 C \operatorname{tg} \delta}{\alpha_т S_{охл}}. \qquad (1\text{-}120)$$

При естественном воздушном охлаждении конденсаторов в металлических корпусах для ориентировочных расчетов можно принимать значение коэффициента теплоотдачи $\alpha_т = 1 \cdot 10^{-3}$ *вт/см²·град*. Фактически $\alpha_т$ зависит от формы и размеров конденсатора и от температуры перегрева.

Величину коэффициента теплоотдачи с учетом охлаждения за счет конвекции воздуха и лучеиспускания можно найти теоретически на основе современных данных теории

теплопередачи. Практически можно использовать эмпирическую зависимость $\alpha_т$ от величины поверхности корпуса, полученную при двух значениях перегрева (рис. 39). Кривые, изображающие эту зависимость, показывают, что заметное отклонение $\alpha_т$ от указанного ориентировочного значения $1 \cdot 10^{-3}$ *вт/см² град* начинается при $S_{охл} = 100$ *см²* и ниже. Перегрев от 20 до 50° С, т. е. в 2,5 раза, изменяет $\alpha_т$ примерно на 20%, т. е. относительно не так значительно, как уменьшение поверхности: при переходе от 100 к 20 *см²* величина $\alpha_т$ возрастает более чем в 2 раза.

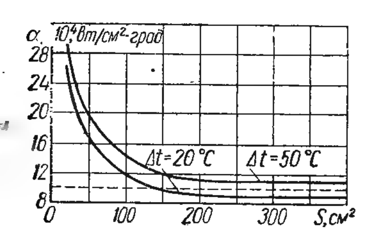


Рис. 39. Кривые зависимости коэффициента теплоотдачи при естественном воздушном охлаждении от величины поверхности корпуса конденсатора при двух значениях перегрева на поверхности корпуса.

Данные рис. 39 соответствуют конденсаторам в прямоугольных и цилиндрических металлических корпусах, поставленных вертикально, т. е. с наибольшим размером корпуса (высотой), расположенным по вертикали. Дополнительные данные о величине $\alpha_т$ применительно к расчету керамических конденсаторов приведены в § 10.

При значительном тепловыделении в конденсаторе величину допускаемого напряжения $U_р$ следует определять не по величине электрической прочности, а по допускаемому нагреву конденсатора и условиям теплоотдачи. Если для конденсатора допустим перегрев $\Delta t_{доп}$, то величину допускаемого рабочего напряжения можно найти, решая уравнение (1-120) относительно $U_р$:

$$U_р = \sqrt{\frac{\alpha_т S_{охл} \Delta t_{доп}}{2\pi f C \operatorname{tg} \delta}}. \qquad (1\text{-}121)$$

Из выражения (1-121) видно, что повысить $U_р$ можно увеличением поверхности охлаждения (например, путем приварки охлаждающих ребер к поверхности корпуса) или увеличением коэффициента теплоотдачи путем применения форсированного охлаждения. При значительном улучшении $\alpha_т$, например, путем применения водяного охлаждения, величина $U_р$ может значительно возрасти и превысить то значение, которое можно установить, исходя из соображе-

ний о величине длительной электрической прочности. В этом случае надо остановиться на величине $U_р$, полученной из расчета на электрическую прочность.

Максимальная температура внутри конденсатора

Из расчета по формуле (1-119) получается значение температуры на наружной поверхности корпуса конденсатора. Однако конденсаторные секции могут быть отделены от стенок корпуса слоем плохо теплопроводящей изоляции (изоляция от корпуса, влагозащитная заливочная масса), которая будет создавать значительное сопротивление на пути движения теплового потока от конденсаторных секций к стенкам корпуса.

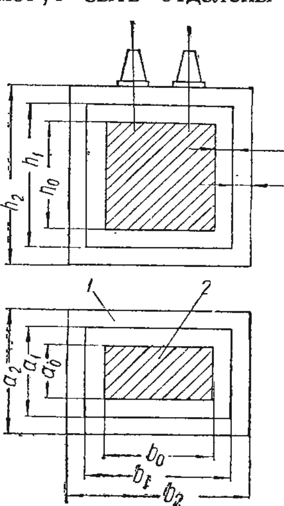


Рис. 40. К расчету температуры на поверхности секции конденсатора.

Если корпус конденсатора *1* изготовлен из электроизоляционного материала (пластмасса, керамика, стекло), то стенка корпуса также может оказать значительное тепловое сопротивление. В соответствии с этим температура $t_с$ на поверхности секции *2* может заметно превышать температуру на поверхности корпуса $t_к$. Когда на пути теплового потока имеется несколько изолирующих слоев (рис. 40) с толщинами Δ_1, Δ_2 и т. д. и со значениями коэффициентов теплопроводности соответственно λ_1, λ_2 и т. д., можно считать, что один и тот же тепловой поток проходит через все эти слои; выражая его (величина этого потока равна потерям в конденсаторе $P_а$) как отношение перепада температуры на слое изоляции к тепловому сопротивлению этого слоя, получаем

$$P_а = \frac{\Delta t_1}{\frac{\Delta_1}{\lambda_1 S_1}} = \frac{\Delta t_2}{\frac{\Delta_2}{\lambda_2 S_2}} = \ldots, \qquad (1\text{-}122)$$

где $P_а$ — в *вт*, λ — в *вт/см·град*, средние значения сечения пути теплового потока S — в *см*², Δ — в *см*.

Это выражение не совсем точно в том отношении, что в слоях изоляции, отделяющих секции от поверхности корпуса, тоже могут быть потери, т. е. подводимый к стенкам корпуса поток тепла будет несколько больше тепла, выделенного в секциях. Однако в большинстве случаев потерями в изоляции от корпуса можно пренебречь в сравнении с потерями в пакете секций.

Предполагая для упрощения, что тепловой поток распространяется от поверхности секций только к боковым стенкам корпуса, запишем:

$$S_1 = 0{,}5\,(h_0 + h_1)\,(a_0 + a_1 + b_0 + b_1);$$
$$S_2 = 0{,}5\,(h_1 + h_2)\,(a_1 + a_2 + b_1 + b_2),$$

где S_1 и S_2 — средние значения площади поверхности, по которой проходит тепловой поток.

Из уравнения (1-122) можно найти перепады температуры на слоях изоляции:

$$\Delta t_1 = \frac{P_{\text{а}}\Delta_1}{\lambda_1 S_1}; \quad \Delta t_2 = \frac{P_{\text{а}}\Delta_2}{\lambda_2 S_2}. \qquad (1\text{-}123)$$

Тогда температура на поверхности пакета секций $t_{\text{с}} = t_{\text{к}} + \Delta t_1 + \Delta t_2 + \ldots$

За счет перепада температур внутри пакета секций максимальная температура активного диэлектрика $t_{\text{макс}}$, которую необходимо иметь в виду при установлении допускаемого значения температуры нагрева, может заметно превышать температуру на поверхности пакета $t_{\text{с}}$. Определение внутренней температуры конденсатора $t_{\text{макс}}$ затрудняется тем обстоятельством, что внутри секции тепло не только проводится, но и создается за счет потерь в диэлектрике и в обкладках. Поэтому нельзя величину теплового потока при его движении из внутренних слоев пакета секций к поверхности пакета считать постоянной.

Определение максимальной температуры внутри бумажно-масляного силового конденсатора было проведено С. К. Медведевым и М. И. Мантровым. Рассуждения М. И. Мантрова более строги в математическом смысле и интересны потому, что полученные выводы можно распространить на намотанные конденсаторы вообще, и не только бумажные, но и пленочные, а также комбинированные с пленочно-бумажным диэлектриком.

При выводе расчетной формулы для $t_{\text{макс}}$ с целью упрощения расчета принимаются следующие допущения:

а) отвод тепла происходит только в направлениях, перпендикулярных боковой поверхности корпуса, теплоотвод в сторону дна и крышки не учитывается;

б) поверхность пакета секций рассматривается как изотермическая, т. е. как поверхность равных температур, изотермической также считается поверхность F (рис. 41), отстоящая от наружной поверхности пакета секций на половину толщины секции Δ_4;

в) тепловой поток внутри объема, ограниченного поверхностью F, протекает только в направлении, параллельном слоям бумаги и фольги;

г) тепловой поток в объеме, ограниченном поверхностью F и наружной поверхностью пакета секций, протекает только в направлении, перпендикулярном слоям бумаги и фольги.

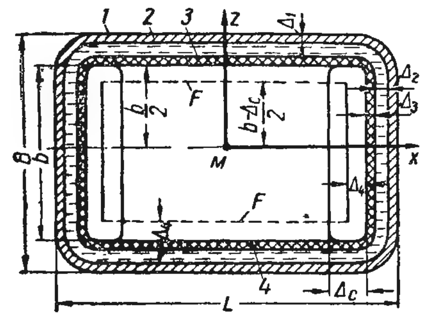


Рис. 41. К расчету максимальной температуры внутри бумажно-масляного силового конденсатора.

Количество тепла, выделяемое в конденсаторе при переменном напряжении $U_\sim$ (эффективное значение), частоте f и емкости C, согласно (1-108)

$$Q_т = 0{,}24 U_\sim^2 C 2\pi f \operatorname{tg}\delta, \qquad (1\text{-}124)$$

где $\operatorname{tg}\delta$ — максимальное значение тангенса угла потерь в объеме, ограниченном изотермической поверхностью F (рис. 41).

Количество тепла, выделяемое при постоянном напряжении U_-,

$$Q'_т = 0{,}24 \frac{U_-^2 C}{T} \text{ кал}, \qquad (1\text{-}125)$$

где T — постоянная времени конденсатора, *ом·ф*, при максимальном значении температуры внутри конденсатора, в объеме, ограниченном изотермической поверхностью F;

U — в *в*; C — в *ф*.

При пульсирующем напряжении, имеющем постоянную составляющую U_- и переменную $U_\sim$, под величиной Q надо

понимать сумму значений, вычисленных по формулам (1-124) и (1-125).

Выделяющееся в конденсаторе тепло из внутреннего объема, ограниченного изотермической поверхностью F, движется к внешней поверхности конденсатора, проходя последовательно через четыре слоя с различными тепловыми сопротивлениями. Этими слоями являются:

а) участок секций конденсатора между внутренней изотермической поверхностью F и поверхностью пакета; толщина его $\Delta_4 = \frac{\Delta_c}{2}$ и коэффициент теплопроводности λ_4;

б) изоляция секций от корпуса — соответственно Δ_3 и λ_3;

в) масляная прослойка между наружной поверхностью слоя изоляции от корпуса и стенкой корпуса — соответственно Δ_2 и λ_2; в связи с малой толщиной этой прослойки конвекция в масле не учитывается;

г) стенка корпуса — соответственно Δ_1 и λ_1.

При тепловом равновесии, когда температура $t_к$ на поверхности корпуса *1* достигла установившегося значения, теплоотдача с поверхности

$$Q_т = \alpha_т S (t_к - t_о), \qquad (1\text{-}126)$$

где $t_о$ — температура окружающей среды;

S — поверхность боковых стенок корпуса, *см²*;

$\alpha_т$ — коэффициент теплоотдачи, который в данном случае должен быть выражен в *кал/сек · см² · град*.

Если высота корпуса H, длина L и ширина B, то боковая поверхность

$$S = 2H (L + B). \qquad (1\text{-}127)$$

По закону непрерывности теплового потока аналогично выражению (1-122), приближенно приняв $S_1 \approx \approx S_2 = \cdots = S$, имеем

$$\frac{Q_т}{S} = \lambda_1 \frac{t_1 - t_к}{\Delta_1} = \lambda_2 \frac{t_2 - t_1}{\Delta_2} = \lambda_3 \frac{t_3 - t_2}{\Delta_3}, \qquad (1\text{-}128)$$

где t_1 — температура внутренней поверхности стенок *2* корпуса;

t_2 — температура наружной поверхности слоя изоляции *3* от корпуса;

t_3 — температура наружной поверхности пакета секций *4*.

Температуру наружной поверхности корпуса находим из уравнения (1-126)

$$t_к = \frac{Q_т}{\alpha_т S} + t_о. \tag{1-129}$$

Используя выражение (1-128), находим значения:

$$t_1 = \frac{\Delta_1 Q_т}{\lambda_1 S} + t_к = \frac{Q_т}{S}\left(\frac{\Delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_т}\right) + t_о; \tag{1-130}$$

$$t_2 = \frac{\Delta_2 Q_т}{\lambda_2 S} + t_1 = \frac{Q_т}{S}\left(\frac{\Delta_1}{\lambda_1} + \frac{\Delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_т}\right) + t_о; \tag{1-131}$$

$$t_3 = \frac{\Delta_3 Q_т}{\lambda_3 S} + t_2 = \frac{Q_т}{S}\left(\frac{\Delta_1}{\lambda_1} + \frac{\Delta_2}{\lambda_2} + \frac{\Delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_т}\right) + t_о. \tag{1-132}$$

Для определения максимальной температуры $t_{макс}$ в центре конденсатора (в точке M) надо определить зависимость температуры в активной части конденсатора от параметра z — расстояния от середины конденсаторной секции для любой точки в конденсаторе, в направлении к широкой боковой стенке (рис. 41). Для объема, ограниченного изотермической поверхностью F, полагаем, что тепловой поток движется параллельно слоям бумаги и фольги. Коэффициент теплопроводности секции в этом направлении

$$\lambda_{\parallel} = \lambda_б \frac{nd_б}{nd_б + d_ф} + \lambda_ф \frac{d_ф}{nd_б + d_ф}, \tag{1-133}$$

где $\lambda_б$ — коэффициент теплопроводности бумаги, пропитанной маслом, *кал/сек·см·град*;

$\lambda_ф$ — коэффициент теплопроводности алюминиевой фольги, *кал/сек·см·град*;

$nd_б$ — суммарная толщина диэлектрика ($d_б$ — толщина одного слоя бумаги, n — число слоев между обкладками);

$d_ф$ — толщина фольги (обкладки конденсатора).

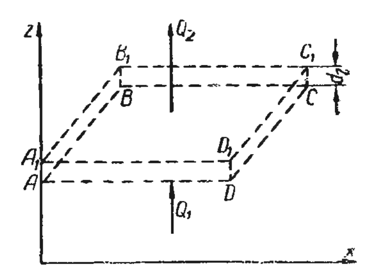


Рис. 42. К расчету тепла, выделяемого в активной части конденсатора.

Выделяем мысленно в активном объеме конденсатора площадку $ABCD$ (рис. 42) в 1 $см^2$, расположенную пер-

пендикулярно направлению движения теплового потока, т. е. перпендикулярно оси z. Количество тепла, входящее в данную площадку за 1 *сек*,

$$Q_1 = -\lambda_{\parallel} \left(\frac{dt}{dz}\right)_1. \qquad (1\text{-}134)$$

В этом выражении знак минус означает, что тепло движется в сторону увеличения z. Через площадку $A_1B_1C_1D_1$, расположенную параллельно $ABCD$ на расстоянии dz (в сторону увеличения z), выходит количество тепла

$$Q_2 = -\lambda_{\parallel} \left(\frac{dt}{dz}\right)_2, \qquad (1\text{-}135)$$

которое больше, чем Q_1, так как в объеме, ограниченном площадками $ABCD$ и $A_1B_1C_1D_1$, за счет потерь дополнительно выделяется некоторое количество тепла ΔQ:

$$Q_2 = Q_1 + \Delta Q. \qquad (1\text{-}136)$$

Чтобы найти ΔQ, рассмотрим величину удельных потерь, отнесенных к единице объема активной части конденсатора,

$$p_{уд} = \frac{P_а}{V}, \qquad (1\text{-}137)$$

где $P_а$ — активная мощность конденсатора, *вт*;
V — объем, *см*^{3}.

При переменном напряжении $U_{\sim}$

$$P_а = 2\pi f U_{\sim}^2 C \operatorname{tg}\delta = 2\pi f U_{\sim}^2\, 0{,}0885 \frac{\varepsilon S}{d} 10^{-12} \operatorname{tg}\delta =$$

$$= \left(\frac{U_{\sim}}{d}\right)^2 0{,}55 \cdot 10^{-12} f \varepsilon \operatorname{tg}\delta\, V = 0{,}55 \cdot 10^{-12} f \varepsilon \operatorname{tg}\delta E^2 V. \qquad (1\text{-}138)$$

Вводим понятие об активной проводимости диэлектрика

$$\gamma_а = 0{,}55 \cdot 10^{-12} f \varepsilon \operatorname{tg}\delta. \qquad (1\text{-}139)$$

Тогда удельные потери можно представить так:

$$p_{уд} = \gamma_а E^2, \qquad (1\text{-}140)$$

где $\gamma_а$ — в *ом*$^{-1}\cdot$*см*$^{-1}$;
E — в *в/см*;
$p_{уд}$ — в *вт/см*^{3}.

При постоянном напряжении U_{-}

$$P_а = \frac{U_{-}^2}{R_{из}} = \frac{U_{-}^2 S}{\rho d} = \frac{U_{-}^2 Sd}{\rho d^2} = \frac{E^2 V}{\rho};\; p_{уд} = \frac{E^2}{\rho} = \gamma E^2. \qquad (1\text{-}141)$$

Величину γ можно найти из соотношения

$$\gamma = \frac{1}{\rho} = \frac{0{,}884 \cdot 10^{-13}\varepsilon}{T}, \qquad (1\text{-}142)$$

где T — постоянная времени конденсатора при температуре $t_{\text{макс}}$.

При постоянном напряжении U_{-} с наложенной на него переменной составляющей $U_{\sim}$ при соотношении $\frac{U_{\sim}}{U_{=}} = \frac{E_{\sim}}{E_{=}} = k_E$ получаем:

$$P_{\text{а}} = \frac{U_{-}^2}{R_{\text{из}}} + 2\pi f U_{\sim}^2 C \operatorname{tg}\delta; \quad p_{\text{уд}} = \gamma E_{-}^2 + \gamma_{\text{а}} E_{\sim}^2 =$$

$$= E_{-}^2 (\gamma + k_E^2 \gamma_{\text{а}}) = \gamma' E_{-}^2. \qquad (1\text{-}143)$$

Приведенное значение проводимости $\gamma' = \gamma + k_E^2 \gamma_{\text{а}}$ учитывает потери как от постоянной, так и от переменной составляющих. При вычислении коэффициента k_E надо брать эффективное значение $U_{\sim}$.

Таким образом, для вычисления удельных потерь во всех случаях можно брать произведение из квадрата напряженности поля на проводимость, выбирая ее значение соответственно γ, $\gamma_{\text{а}}$ или γ'.

Количество тепла, выделяемое в параллелепипеде высотой dz и площадью основания 1 *см*², можно найти, умножив удельные потери на dz и множитель 0,24 (для перехода от ватт к калориям):

$$\Delta Q = 0{,}24 p_{\text{уд}}\, dz = 0{,}24 \gamma E^2\, dz. \qquad (1\text{-}144)$$

Так как выделение тепла рассматривается в единицу времени, то ΔQ, Q_1 и Q_2 выражены в *кал/сек*.

Используя выражения (1-134), (1-135) и (1-144), получаем дифференциальное уравнение, изображающее искомую зависимость температуры внутри конденсатора от расстояния по оси z,

$$-\lambda_{\parallel} \left(\frac{dt}{dz}\right)_2 = -\lambda_{\parallel} \left(\frac{dt}{dz}\right)_1 + 0{,}24 \gamma E^2\, dz, \qquad (1\text{-}145)$$

или

$$\lambda_{\parallel} \frac{1}{dz} \left[\left(\frac{dt}{dz}\right)_2 - \left(\frac{dt}{dz}\right)_1\right] + 0{,}24 \gamma E^2 = 0,$$

или

$$\lambda_{\parallel} \frac{d^2 t}{dz^2} + 0{,}24 \gamma E^2 = 0. \qquad (1\text{-}146)$$

Принимаем, что в объеме, ограниченном изотермической поверхностью F, величина γ будет постоянной; значение E также не зависит от температуры и от z. Интегрируя выражения при этих условиях, получаем

$$\lambda_{\parallel} \frac{dt}{dz} + 0{,}24\gamma E^2 z = c_1, \qquad (1\text{-}147)$$

или

$$\lambda_{\parallel} t + 0{,}12\gamma E^2 z^2 = c_1 z + c_2. \qquad (1\text{-}148)$$

Найдем постоянные интегрирования c_1 и c_2 в центре конденсатора, т. е. при $z = 0$ и $t = t_{\text{макс}}$. Подставив эти значения в уравнение (1-148), получим $c_2 = \lambda_{\parallel} t_{\text{макс}}$.

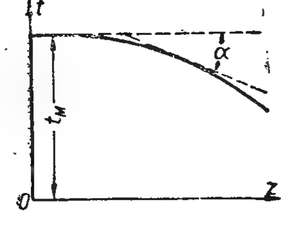


Рис. 43. К определению температуры в центре силового конденсатора.

В центре конденсатора ($z = 0$) температура проходит через максимум, поэтому касательная к кривой $t = f(z)$ в этой точке должна быть параллельной оси z, т. е. $\left(\frac{dt}{dz}\right) = 0$ (рис. 43). Подставив эти значения в уравнение (1-147), находим $c_1 = 0$. Тогда уравнение (1-148) принимает вид

$$\lambda_{\parallel} t + 0{,}12\gamma E^2 z^2 = \lambda_{\parallel} t_{\text{макс}}. \qquad (1\text{-}149)$$

Таким образом, найден характер зависимости температуры внутри конденсатора от расстояния по оси z.

Решая это уравнение относительно t, получим

$$t = t_{\text{макс}} - \frac{0{,}12\gamma E^2 z^2}{\lambda_{\parallel}}. \qquad (1\text{-}150)$$

На изотермической поверхности F, определяемой значением $z = \frac{b - \Delta_c}{2}$ (рис. 41), температура имеет значение t_4. При этом, согласно уравнению (1-150), получаем:

$$t_4 = t_{\text{макс}} - \frac{0{,}12\gamma E^2 (b - \Delta_c)^2}{4\lambda_{\parallel}};$$

$$t_{\text{макс}} = t_4 + \frac{0{,}03\gamma E^2 (b - \Delta_c)^2}{\lambda_{\parallel}}. \qquad (1\text{-}151)$$

Из выражения (1-151) можно найти максимальную температуру $t_{\text{макс}}$, если известна температура t_4. Для этого найдем перепад температур в слое Δ_4, отделяющем изотермическую

поверхность F от поверхности пакета секций, также рассматриваемую как изотермическую.

Если до поверхности F тепловой поток двигался параллельно слоям бумаги и фольги, то в слое Δ_4 (рис. 41) значительная часть его пойдет уже перпендикулярно этим слоям (рис. 44). Для упрощения полагаем, что весь тепловой поток на участке Δ_4 будет направлен перпендикулярно слоям бумаги и фольги, т. е. заменим левую часть рис. 44 упрощенной правой частью. В этом случае необходимо пользоваться коэффициентом теплопроводности $\lambda_\perp$, который можно найти из соотношения

$$\lambda_\perp = \frac{\lambda_б \lambda_ф (n d_б + d_ф)}{\lambda_ф n d_б + \lambda_б d_ф}. \qquad (1\text{-}152)$$

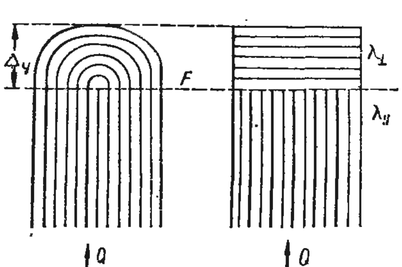


Рис. 44. К расчету теплопроводности секции конденсатора.

Это соотношение соответствует последовательному включению тепловых сопротивлений слоев бумаги и фольги.

В слое Δ_4, как и во внутренней части секции, также происходит выделение тепла. Поэтому при рассмотрении изменения температуры в этом слое можно воспользоваться уравнением (1-146), заменив в нем величину $\lambda_\parallel$ на $\lambda_\perp$,

$$\lambda_\perp \frac{d^2 t}{dz^2} + 0{,}24\gamma E^2 = 0. \qquad (1\text{-}153)$$

Решив это уравнение аналогично уравнению (1-146), получим

$$\lambda_\perp t + 0{,}12\gamma E^2 z^2 = c_1 z + c_2. \qquad (1\text{-}154)$$

При $z = 0$, $\frac{dt}{dz} = 0$ и $c_1 = 0$.

На верхней границе слоя Δ_4, т. е. на поверхности пакета секций, при $z = \frac{b}{2}$ имеем $t = t_3$. Тогда $c_2 = \lambda_\perp t_3 + 0{,}12\gamma E^2 \frac{b^2}{4}$. При этом решение уравнения (1-154) принимает вид

$$\lambda_\perp t = \lambda_\perp t_3 + \frac{0{,}12\gamma E^2}{4} - 0{,}12\gamma E^2 z^2 \qquad (1\text{-}155)$$

или

$$t = t_3 + \frac{0{,}12\gamma E^2}{\lambda_{\perp}}\left(\frac{b^2}{4} - z^2\right). \qquad (1\text{-}156)$$

Из этого уравнения можно найти температуру t_4 на изотермической поверхности F, соответствующую $z = \frac{b-\Delta_c}{2}$,

$$t_4 = t_3 + \frac{0{,}12\gamma E^2}{\lambda_{\perp}}\left(\frac{b^2}{4} - \frac{b^2 - 2b\Delta_c + \Delta_c^2}{4}\right) =$$

$$= t_3 + \frac{0{,}03\gamma E^2}{\lambda_{\perp}}(2b\Delta_c - \Delta_c^2). \qquad (1\text{-}157)$$

Подставив значение t_4 из уравнения (1-157) в уравнение (1-151), находим максимальную температуру в центре конденсатора

$$t_{\text{макс}} = t_3 + \frac{0{,}03\gamma E^2}{\lambda_{\perp}}(2b\Delta_c - \Delta_c^2) + \frac{0{,}12\gamma E^2}{4\lambda_{\parallel}}(b - \Delta_c)^2,$$

или

$$t_{\text{макс}} = t_3 + 0{,}03\gamma E^2\left[\frac{2b\Delta_c - \Delta_c^2}{\lambda_{\perp}} + \frac{(b-\Delta_c)^2}{\lambda_{\parallel}}\right]. \qquad (1\text{-}158)$$

Значение t_3 известно из уравнения (1-132). Перепишем его в другой форме

$$t_3 = \frac{Q_{\text{т}}k_3}{\alpha_{\text{т}}S} + t_{\text{o}}, \qquad (1\text{-}159)$$

где

$$k_3 = 1 + \alpha_{\text{т}}\left(\frac{\Delta_1}{\lambda_1} + \frac{\Delta_2}{\lambda_2} + \frac{\Delta_3}{\lambda_3}\right). \qquad (1\text{-}160)$$

Подставляя значение t_3 из уравнения (1-159) в уравнение (1-158), находим

$$t_{\text{макс}} = \frac{Q_{\text{т}}k_3}{\alpha_{\text{т}}S} + 0{,}03\gamma E^2\left[\frac{2b\Delta_c - \Delta_c^2}{\lambda_{\perp}} + \frac{(b-\Delta_c)^2}{\lambda_{\parallel}}\right] + t_{\text{o}}. \qquad (1\text{-}161)$$

Таким образом, перепад температур между наиболее нагретой точкой в центре конденсатора и окружающей средой по Мантрову

$$t_{\text{макс}} - t_{\text{o}} = \frac{Q_{\text{т}}k_3}{\alpha_{\text{т}}S} + 0{,}03\gamma E^2\left[\frac{2b\Delta_c - \Delta_c^2}{\lambda_{\perp}} + \frac{(b-\Delta_c)^2}{\lambda_{\parallel}}\right]. \qquad (1\text{-}162)$$

Значения коэффициентов теплопроводности различных материалов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значения коэффициентов теплопроводности некоторых материалов, применяемых в конденсаторостроении

Материал	Коэффициент теплопроводности	
	вт/см·град	*кал/сек·см·град*
Полистирол	0,0008	0,00019
Полихлорвинил	0,0009	0,00022
Битум нефтяной	0,001—0,0014	0,00024—0,00034
Бакелит (фенольно-альдегидная смола)	0,0012—0,0025	0,0003—0,0006
Бумага непропитанная	0,0013	0,00031
» пропитанная соволом	0,0016	0,00038
» » маслом	0,0017	0,00041
Электрокартон, пропитанный	0,0017	0,00041
Гетинакс	0,0017	0,00041
Резина	0,001	0,00024
Полиметилметакрилат	0,0016—0,0025	0,00038—0,0006
Пластмасса фенопласт	0,0018	0,00043
Фторопласт-4	0,0025	0,0006
Карбамидная смола	0,003	0,0007
Парафин	0,002—0,0025	0,00048—0,0006
Совол	0,001	0,00024
Масло нефтяное	0,0015—0,002	0,00036—0,00048
Слюда, перпендикулярно слоям	0,0035—0,004	0,00085—0,001
Фарфор изоляторный	0,01	0,0024
Тиконд	0,03	0,0072
Алюминоксид	0,15	0,036
Сталь	0,586	0,141
Алюминий чистый	2,22	0,585
Алюминиевая фольга	2,0	0,48
Медь	3,93	0,945

Формула (1-162) не учитывает зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры. Поэтому, если добиваться увеличения точности расчета по этой формуле, следовало бы сначала ориентировочно задаться возможной температурой перегрева на поверхности корпуса. По ней выбрать величину $\alpha_т$ (или вычислить его, пользуясь данными теории теплопередачи). Далее вычислить фактический перегрев и, если он будет отличаться достаточно заметно от того значения, по которому выбирался или рассчитывался коэффициент теплоотдачи, снова выбрать значение $\alpha_т$, ближе под-

ходящее к полученной температуре, действуя таким методом приближения, пока не получится достаточная сходимость значений температуры на поверхности корпуса и той температуры, по которой выбирался коэффициент теплоотдачи.

Для цилиндрического корпуса конденсатора (применительно к расчету электролитических конденсаторов) вычисление максимальной температуры внутри конденсатора, с учетом зависимости коэффициента теплоотдачи от температуры на поверхности корпуса, выполнил Л. Н. Закгейм. Полученные им расчетные формулы, с соответствующим пересмотром исходных данных пригодные и для расчета других типов цилиндрических конденсаторов, приводятся в § 23.

Некоторые данные о тепловом расчете керамических конденсаторов даются в § 10.

Пример теплового расчета конденсатора с принудительным воздушным и водяным охлаждением приведен в § 16.

Перегрузочные характеристики конденсаторов

Вопрос о допустимой перегрузке конденсаторов был рассмотрен С. К. Медведевым применительно к бумажным силовым конденсаторам, но имеет более общий интерес, так как полученные выводы можно использовать применительно к другим типам конденсаторов, нагружаемых значительной реактивной мощностью.

При тепловом расчете конденсаторов исходят из заданного значения максимальной температуры, которую может длительно выдерживать диэлектрик. Для бумаги, пропитанной маслом, максимально допускаемая температура составляет 65—70° С, а при пропитке хлорированной жидкостью (типа совол) — 90 — 95° С. При длительной непрерывной работе рекомендуется ориентироваться на нижний предел этих цифр. При заданном значении $t_{макс}$ допускаемый перегрев конденсатора $\Delta t_{доп}$ определяется заданным для расчета значением температуры окружающей среды t_0, так как $\Delta t_{доп} = t_{макс} - t_0$. Расчет ведется на наибольшее возможное в условиях эксплуатации значение t_0. Если фактически конденсатор будет работать при более низкой температуре, то при том же значении $t_{макс}$ реактивная мощность его может быть повышена. При расчете конденсатора обычно подставляют в расчетные формулы не номинальное значение емкости, а допускаемое максимальное, равное

$C_н + \Delta C_н$, где $\Delta C_н$ — допускаемое отклонение емкости от номинала в сторону ее превышения. Если фактически емкость конденсатора меньше отклоняется от номинала, то конденсатор недогружен в тепловом отношении. Таким образом, не превышая допускаемого значения $t_м$ в наиболее нагретой центральной части конденсатора, можно иногда повысить подводимую к нему реактивную мощность.

Если обозначить через $P_н$ номинальную реактивную мощность, соответствующую номинальным емкости, рабочей частоте и напряжению, и учесть, что для силовых конденсаторов допускается превышение номинальной емкости на 15% и предусматривается возможность работы при напряжении на 10% выше номинального, то выражение для активной мощности, теряемой в конденсаторе, несколько отличается от уравнения (1-118):

$$P_а = 2\pi f 1{,}1^2 U_н^2 k_C 1{,}15 C_н \operatorname{tg}\delta = P_н k k_C \operatorname{tg}\delta, \qquad (1\text{-}163)$$

где k_C — коэффициент, учитывающий зависимость емкости от температуры, а коэффициент $k = 1{,}15 \times 1{,}1^2 = 1{,}39$.

Решая уравнение (1-163) относительно $P_н$, получаем

$$P_н = \frac{P_а}{k k_C \operatorname{tg}\delta} = \frac{A \Delta t_{доп}}{k k_C \operatorname{tg}\delta} = \frac{A}{k} I_P, \qquad (1\text{-}164)$$

где $\Delta t_{доп} = t_м - t_о$;

$A = \dfrac{P_а}{\Delta t_{доп}}$ — коэффициент, определяющий условия передачи тепла от наиболее нагретой точки конденсатора к окружающему воздуху;

$k_C \operatorname{tg}\delta$ — коэффициент потерь;

$I_P = \dfrac{\Delta t_{доп}}{k_C \operatorname{tg}\delta}$ — показатель мощности, определяемый качеством диэлектрика, разделяющего обкладки конденсатора.

Приведенные данные показывают, что при снижении $\operatorname{tg}\delta$ в сравнении с максимальным допускаемым его значением также можно увеличить нагрузку конденсатора реактивной мощностью при заданном значении допустимой установившейся температуры перегрева.

Зависимость установившейся температуры перегрева на поверхности корпуса (сплошные кривые) и в наиболее горячей точке (штрихи) для силовых конденсаторов трех

размеров (1 — 380 × 110 × 360, 2 — 318 × 145 × 855 и 3 — 646 × 126 × 985 *мм*) от мощности потерь в них приведена по данным С. К. Медведева на рис. 45. Если для бумажно-масляных конденсаторов наибольшее значение температуры окружающей среды 40° С, то допускаемое значение $\Delta t_у$, как видно из кривых на рис. 45, получается при значениях потерь: 50 *вт* для 1-го, около 90 *вт* — для 2-го и около 230 *вт* для 3-го размеров. Если потери будут меньше этих значений, то реактивную мощность конденсатора можно соответственно повысить при сохранении заданного значения $\Delta t_у = 25°$ С (65° — 40° = 25° С).

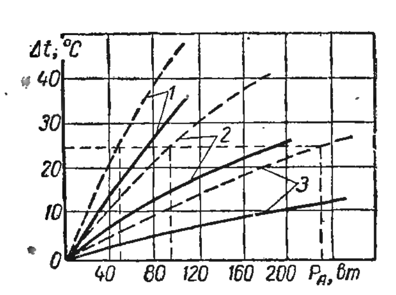


Рис. 45. Кривые зависимости установившейся температуры перегрева на поверхности корпуса (сплошные кривые) и в наиболее горячей точке (штрихи) от мощности потерь в конденсаторе для силовых конденсаторов трех габаритов.

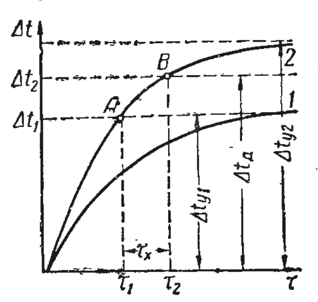


Рис. 46. Кривые зависимости температуры перегрева конденсатора от времени при двух значениях реактивной мощности: P_1 и P_2.

Зависимость температуры перегрева конденсатора от времени характеризуется уравнением

$$\Delta t = \Delta t_у \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}}\right), \qquad (1\text{-}165)$$

где T — тепловая постоянная времени конденсатора, определяемая тем временем, за которое температура перегрева конденсатора достигает 66,6% от установившегося значения.

Если конденсатор длительно работал при мощности P_1 ниже предельно допустимой и в нем установился перегрев $\Delta t_{у1}$, то в течение времени τ_x допустима перегрузка мощностью $P_2 > P_1$ до тех пор, пока перегрев не достигнет допускаемого значения $\Delta t_{доп}$. На рис. 46 кри-

вая *1* соответствует работе конденсатора при мощности P_1 и кривая *2* — при мощности P_2. Для точки *A*, соответствующей перегреву $\Delta t_{у1}$, который по кривой *2* был бы получен за время τ_1,

$$\Delta t_{у1} = \Delta t_{у2} \left(1 - e^{-\frac{\tau_1}{T}}\right). \qquad (1\text{-}166)$$

Преобразовывая это уравнение, получаем

$$\Delta t_{у2} - \Delta t_{у1} = \Delta t_{у2} e^{-\frac{\tau_1}{T}} \quad \text{и} \quad \ln(\Delta t_{у2} - \Delta t_{у1}) = \ln \Delta t_{у2} - \frac{\tau_1}{T}. \qquad (1\text{-}167)$$

Аналогично для точки *B*, соответствующей на кривой *2* допускаемому перегреву $\Delta t_{доп}$, полученному за время τ_2, имеем

$$\ln(\Delta t_{у2} - \Delta t_{доп}) = \ln \Delta t_{у2} - \frac{\tau_2}{T}. \qquad (1\text{-}168)$$

Значение времени τ_x получим, вычитая выражение (1-168) из (1-167) и преобразовывая,

$$\tau_x = \tau_2 - \tau_1 = T \ln \frac{\Delta t_{у2} - \Delta t_{у1}}{\Delta t_{у2} - \Delta t_{доп}}. \qquad (1\text{-}169)$$

Если принять, что при установившемся тепловом состоянии температуры перегрева пропорциональны значениям мощности, то

$$\tau_x = T \ln \frac{k_2 - k_1}{k_2 - k_{доп}}, \qquad (1\text{-}170)$$

где k_1 — коэффициент загрузки конденсатора до возникновения перегрузки;

k_2 — коэффициент перегрузки конденсатора;

$k_{доп}$ — длительно допускаемый коэффициент перегрузки, соответствующий мощности при напряжении на 10% выше номинального ($k_{доп} = 1{,}21$).

Коэффициенты увеличения напряжения, соответствующие коэффициентам перегрузки по мощности, определяются значениями корней квадратных из соответствующих значений коэффициентов *k*, т. е. $k_{U_1} = \sqrt{k_1}$ и т. д.

Постоянная времени *T* для 1-го и 2-го размеров конденсаторов составляет 2,25 *ч* и для 3-го — 4 *ч*.

Температура перегрева, соответствующая нарушению теплового равновесия конденсатора, т. е. тепловому пробою, и реактивная мощность, соответствующая разогреву

до этой температуры, обычно значительно выше номинальной мощности конденсатора и соответствующей ей температуры перегрева.

Иногда полезно определить то значение реактивной мощности, которое соответствует нарушению теплового равновесия, чтобы найти запас по отношению к тепловому пробою, заложенный в конструкции конденсатора.

Эту задачу можно легко решить графически, если задана кривая зависимости коэффициента потерь $k_C \operatorname{tg}\delta$ от температуры (рис. 47) и известно значение перегрева $\Delta t_у$, при некотором значении мощности P.

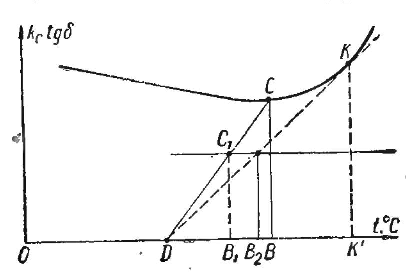


Рис. 47. Графическое определение реактивной мощности, соответствующей нарушению теплового равновесия конденсатора.

В соответствии с уравнением (1-164)

$$P = A \frac{\Delta t_у}{k_C \operatorname{tg}\delta}. \qquad (1\text{-}171)$$

На графике (рис. 47) откладываем по оси абсцисс отрезок OD, соответствующий температуре окружающей среды t_0, и далее отрезок DB, соответствующий перегреву $\Delta t_у$ при известной мощности P. Восстановив перпендикуляр из точки B до его пересечения с кривой зависимости коэффициента потерь от температуры, получаем точку C. Отрезок BC будет равен величине $k_C \operatorname{tg}\delta$ при температуре перегрева $\Delta t_у$. Реактивную мощность находим из выражения

$$P = A \frac{DB}{BC} = \frac{DB_1}{B_1C_1} A. \qquad (1\text{-}172)$$

Через некоторую точку C_1 на отрезке CD проводим линию, параллельную оси абсцисс. Точка C_1 выбирается с таким расчетом, чтобы отрезок DB_1 выражал мощность в удобном масштабе. Мощность P пропорциональна длине этого отрезка согласно формуле (1-172), поскольку B_1C_1 и A будут постоянными величинами.

Для определения критической мощности $P_{кр}$, соответствующей нарушению теплового равновесия при заданной температуре t_0, проводим через точку D касательную к кривой $k_C \operatorname{tg}\delta = f(t)$. Опустив из точки касания K перпендику-

ляр на ось абсцисс, находим точку K', которая дает значение критической температуры $t_{кр}$, соответствующей нарушению теплового равновесия. Отрезок DB_2 дает в масштабе значение критической мощности $P_{кр}$. Значения $P_{кр}$ и $t_{кр}$ зависят от температуры окружающей среды.

Испытание силовых конденсаторов на стабильность обычно проводится при напряжении на 20% выше номинального, т. е. при мощности на 44% выше номинальной. Если считать, что при этом должен быть запас по отношению к $P_{кр}$, хотя бы на 100%, то максимальная допускаемая мощность $P_{доп}$ будет ниже критической в 1,3 раза, а номинальная — в 1,8 раза. Это дает гарантию против возможности развития теплового пробоя.

Устанавливая допускаемые тепловые перегрузки конденсаторов, надо иметь в виду, что, повышая напряжение, нельзя превышать значений напряжения начала ионизации и снижать необходимый запас электрической прочности конденсатора.

§ 7. РАСЧЕТ ПРОХОДНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

Проходные изоляторы, служащие для изолирования выводов конденсатора один от другого и от корпуса, подвергаются электрическим, механическим, тепловым и атмосферным воздействиям. К ним предъявляются следующие основные требования: достаточный запас по электрической прочности при длительной работе, перенапряжениях и изменении атмосферных условий, оговоренных в технических условиях на проектирование конденсатора; достаточный запас механической прочности. Как и всякая другая изоляционная конструкция, проходные изоляторы должны иметь возможно меньшие размеры, вес и стоимость.

При конструировании изолятора большое значение имеет выбор его высоты, так как этот размер существенно влияет на габаритные размеры по высоте всего конденсатора.

Наиболее распространенным материалом, удовлетворяющим условиям механической и электрической прочности и атмосферостойкости, является фарфор, хотя в последнее время наряду с фарфоровыми в конденсаторостроении применяются также стеклянные изоляторы.

Проходной изолятор (рис. 48) состоит из следующих основных частей: верхняя — работающая на воздухе,

нижняя — работающая в масле, шейка — место закрепления изолятора в арматуре. Изолятор имеет внутреннюю полость, где проходит токоведущий стержень или пластина.

Поверхность верхней части изолятора, работающей в воздухе, изготовляется либо гладкой (рис. 48, *б*, *в*), если конденсатор предназначен для работы в закрытых помещениях, либо ребристой — для работы на открытом воздухе

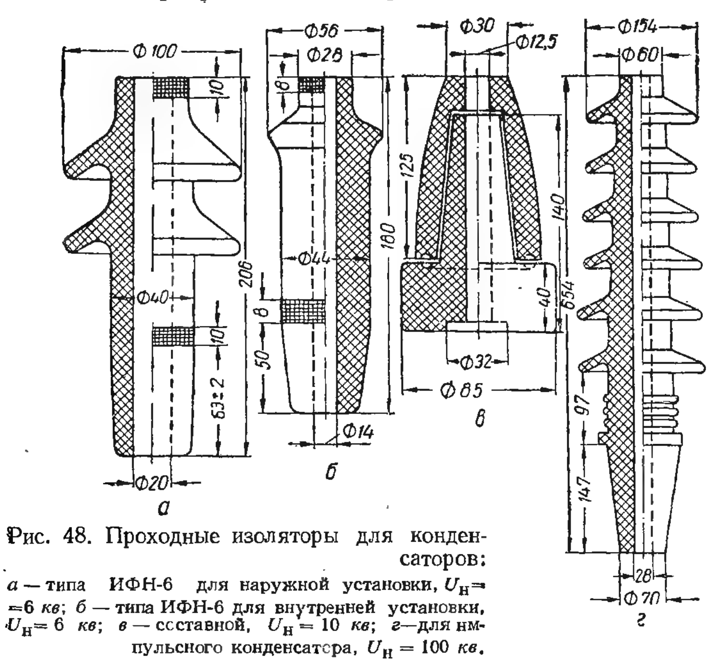


Рис. 48. Проходные изоляторы для конденсаторов:

а — типа ИФН-6 для наружной установки, $U_н = 6$ *кв*; *б* — типа ИФН-6 для внутренней установки, $U_н = 6$ *кв*; *в* — составной, $U_н = 10$ *кв*; *г*—для импульсного конденсатора, $U_н = 100$ *кв*.

(рис. 48, *а*, *г*). Изоляторы с гладкой поверхностью обычно имеют в верхней части одно ребро, служащее для выравнивания электрического поля в месте выхода штыря из полости изолятора. Нижняя часть изолятора, работающая в масле, имеет либо гладкую, либо волнистую поверхность.

При конструировании изолятора прежде всего определяют его форму, а затем производят электрический и механический расчет. По результатам расчета иногда приходится изменять форму изолятора. Исходными данными для расчета изоляторов являются величины номинального, испытательного и выдерживаемого напряжений (табл. 5 и 6).

Таблица 5

Испытательные напряжения при частоте 50 *гц*

Класс напряжений $U_н$, *кв*	3	6	10	15	20	35
Наибольшее рабочее напряжение, *кв*	3,5	6,9	11,5	17,5	23	40,5
Одноминутное испытательное напряжение $U_{исп}$, *кв*	25	32	42	57	68	100
Выдерживаемое напряжение при плавном подъеме $U_в$, *кв*	27	36	47	63	75	110
$\frac{U_в}{U_{исп}}$	1,08	1,12	1,12	1,1	1,1	1,1
$\frac{U_в}{U_н}$	9	6	4,7	4,2	3,75	3,14

Таблица 6

Испытательные напряжения при импульсах (полная волна)

Класс напряжений $U_н$, *кв*	3	6	10	15	20	35	110	150	220
Испытательное напряжение $U_{исп}$, *кв макс*	44	60	80	105	125	195	480	660	950
$\frac{U_{исп}}{U_н}$	14,7	10	8	7	6,2	5,5	4,3	4,3	4,3

Данные табл. 5 и 6 относятся к изоляторам, испытываемым в отдельности. Необходимо учитывать, что в конструкции конденсатора изоляторы подвергаются действию меньших испытательных напряжений, в результате чего дополнительно повышается запас электрической прочности.

При переходе к более высоким напряжениям кратность испытательного и выдерживаемого напряжения по отношению к номинальному уменьшается. Сохранение больших значений запаса электрической прочности при высоких напряжениях приводило бы к большой затрате материала изолятора, что экономически не оправдано.

В любом проходном изоляторе возможны два вида нарушения электрической прочности: пробой в радиальном направлении через толщу изолятора и перекрытие в аксиальном направлении — по поверхности изолятора. Цель электрического расчета изолятора — определить его аксиальный и радиальный размеры.

Так как фарфоровые изоляторы выдерживают кратковременные перекрытия дугой небольшой мощности, а пробой по толще выводит изолятор из строя, то при конструировании они выдерживают соотношение

$$\frac{U_{пр}}{U_{пк}} \geqslant 1{,}3, \qquad (1\text{-}173)$$

где $U_{пр}$ — пробивное напряжение;
$U_{пк}$ — напряжение перекрытия.

В конструкции изолятора не должны также возникать коронирование и скользящие разряды при рабочем напряжении.

Определение размеров изолятора в аксиальном направлении

Исходными данными для определения размеров изолятора в аксиальном направлении являются данные (ГОСТ 1516—60) о выдерживаемом напряжении для заданного класса изоляции (табл. 5 и 6).

Высота фарфорового изолятора с гладкой или волнистой поверхностью, работающего в воздухе при переменном напряжении частотой $f = 50$ *гц*, определяется из эмпирической формулы

$$U_{пк} = 6 + 2{,}5h, \qquad (1\text{-}174)$$

где $U_{пк}$ — перекрывающее напряжение (действующее значение), *кв*;
h — длина пути перекрытия, *см*.

Для изоляторов с ребристой поверхностью

$$U_{пк} = 30 + 2{,}9h. \qquad (1\text{-}175)$$

Для гладкого изолятора при воздействии импульсного напряжения

$$U_{пк} = k\frac{\sqrt[5]{h}}{\sqrt[2,5]{c_{уд}}} \cdot \frac{1}{\sqrt[20]{\frac{dU}{dt}}}, \qquad (1\text{-}176)$$

где h — длина пути перекрытия, *см*;
$c_{уд}$ — удельная поверхностная емкость, *ф/см*^{2};

$\frac{dU}{dt}$ — скорость изменения приложенного напряжения, *кв/мксек*;

k — коэффициент, равный $0,41 \cdot 10^{-8}$ — для импульсов отрицательной полярности и $0,48 \cdot 10^{-7}$ — для импульсов положительной полярности.

Длина нижней части изолятора, находящейся в масле, выбирается из условия, что при разрядном напряжении средняя напряженность не превышает 6,5 — 7 *кв/см* (действующие значения). Кроме того, при определении размеров нижней части изолятора следует учитывать возможность снижения уровня масла в конденсаторе, вследствие чего снижается напряжение перекрытия между корпусом и токоведущим стержнем изолятора.

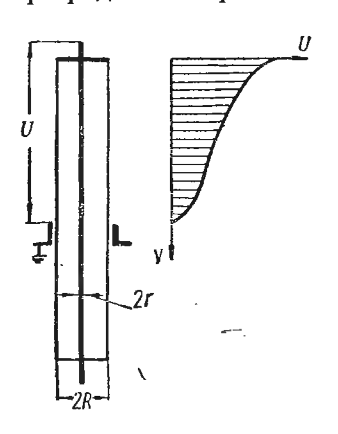


Рис. 49. График распределения напряжения вдоль поверхности цилиндрического проходного изолятора.

При одной и той же высоте изолятора h напряжение перекрытия имеет различную величину в зависимости от степени отклонения кривой распределения напряжения вдоль поверхности изолятора от прямой линии. Определение степени неравномерности распределения напряжения по поверхности изолятора является лучшим способом оценки правильности выбора формы поверхности изолятора. На рис. 49 показано распределение напряжения вдоль поверхности цилиндрического изолятора. Из этого рисунка следует, что наибольшая напряженность поля будет в областях, прилегающих к электродам. Повышение напряженности у электродов снижает напряжение появления скользящих разрядов и перекрытия.

Изменением формы, перекрывающей поверхности, можно повысить напряжение перекрытия.

Напряжение появления скользящих разрядов зависит от удельной поверхностной емкости $c_{уд}$ изолятора:

$$U_{ск} = \frac{1,36 \cdot 10^{-4}}{c_{уд}^{0,44}} \; кв, \qquad (1\text{-}177)$$

где $c_{уд}$ выражено в *ф/см*² и определяется для цилиндрического изолятора по формуле

$$c_{уд} = \frac{C}{S} = \frac{\varepsilon h}{2 \ln \frac{R}{r} 2\pi R h \cdot 9 \cdot 10^{11}} = \frac{\varepsilon}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^{11} R \ln \frac{R}{r}}. \quad (1\text{-}178)$$

При увеличении наружного радиуса изолятора увеличивается удельная поверхностная емкость в месте наибольшей напряженности, вследствие чего возрастает напряжение появления скользящих разрядов. Рационально образовывать ребра у верхнего электрода (см. рис. 48, *б*), что, помимо местного увеличения радиуса *R*, увеличивает и длину пути перекрытия.

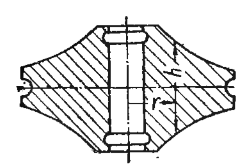


Рис. 50. Проходной изолятор с равномерным распределением напряжения вдоль его поверхности.

Ленинградским электротехническим институтом им. В. И. Ульянова (Ленина) разработаны формы проходных изоляторов, где распределение напряжения по поверхности изолятора имеет линейный характер и местные повышения напряженности поля у электродов исключены. Один из таких изоляторов изображен на рис. 50. У этого изолятора толщина *h* убывает с увеличением радиуса *r*, т. е. произведение *hr* приблизительно постоянно.

Поверхности сечения таких изоляторов эквипотенциальными поверхностями имеют близкие по величине площади, что и приводит к равномерному распределению напряжения как в аксиальном, так и в радиальном направлении.

Определение размеров изолятора в радиальном направлении

При выборе радиальных размеров изолятора следует учитывать, что минимальный радиус внутренней полости должен быть больше радиуса токоведущего стержня

$$r_{мин} = \sqrt{\frac{I}{\pi j}}, \quad (1\text{-}179)$$

где $r_{мин}$ — минимальный радиус стержня, *мм*;
I — ток, протекающий через стержень, *а*;
j — допустимая плотность тока, *а/мм*².

Величину радиуса стержня $r_{мин}$ можно изменять только в сторону увеличения, если этот размер не обеспечивает достаточной механической прочности токоведущего стержня или его размеры не удачны для монтажа выводов конденсаторов. Стержень может быть заменен трубкой, имеющей сечение

$$\pi (R_2^2 - R_1^2) = \pi r_{мин}^2. \qquad (1\text{-}180)$$

Система внутренний стержень — металлический фланец изолятора представляет собой цилиндрический конденсатор, где напряженность имеет максимальное значение на поверхности внутреннего электрода и убывает по мере приближения к наружному электроду

$$E = \frac{U}{r_x \ln \frac{R}{r}}. \qquad (1\text{-}181)$$

Максимальное значение напряженности будет при $r_x = r$, т. е. на поверхности электрода меньшего радиуса.

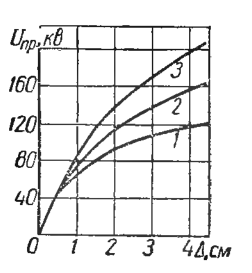


Рис. 51. Кривые зависимости пробивного напряжения фарфора от толщины образца:

1 — фарфор низкого качества; *2* — фарфор среднего качества; *3* — фарфор высокого качества.

При постоянной величине R, как это следует из теории цилиндрического конденсатора, наименьшее из возможных максимальных значений напряженностей будет при $\frac{R}{r} = 2{,}7$. Это соотношение является оптимальным для выбора размеров R и r, однако при их выборе необходимо учитывать и разность $R - r = \Delta$, определяющую толщину стенки изолятора. Кривые зависимости пробивного напряжения от толщины фарфора показаны на рис. 51. Из рисунка следует, что у фарфора различных сортов электрическая прочность меняется в значительных пределах.

Для фарфора среднего качества (кривая *2* на рис. 51) электрическая прочность для значений толщины до 4 *см* выражается уравнением

$$E_{пр} = \frac{80}{\sqrt{\Delta}}. \qquad (1\text{-}182)$$

Если принять, что разрушение изолятора начинается, когда напряженность на поверхности цилиндра меньшего

радиуса достигает пробивных значений для фарфора, то из уравнений (1-181) и (1-182) после замены $R = r + \Delta$ получаем

$$U_{\text{пр}} = \frac{80}{\sqrt{\Delta}} r \ln\left(1 + \frac{\Delta}{r}\right). \qquad (1\text{-}183)$$

Численные значения $U_{\text{пр}}$ для интервала толщин 0,5—4 *см* и $r = 0{,}25 \div 3$ *см* представлены на рис. 52. Величина пробивного напряжения согласно рис. 52 при одном и том же значении Δ резко снижается при уменьшении величины r, а при малых значениях r после прохождения максимума начинает снижаться при возрастании Δ.

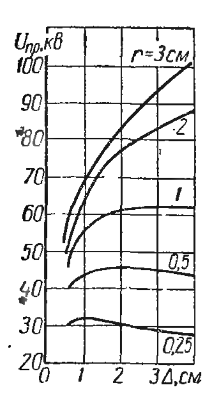


Рис. 52. Кривые зависимости пробивного напряжения изолятора от толщины его стенки при разных значениях радиуса внутренней полости.

Пробивное напряжение изолятора, как указывалось выше, должно быть на 30% больше напряжения перекрытия. Напряжения перекрытия для различных номинальных напряжений изоляторов были даны в табл. 5 и 6. Следовательно, по заданному номинальному напряжению определяется и $U_{\text{пр}} = 1{,}3 U_{\text{пк}}$, значение которого подставляется в уравнения, определяющие радиальные размеры изолятора.

Уравнения (1-181) и (1-183) относятся к случаю, когда радиус токоведущего стержня равен радиусу внутренней полости изолятора. Обычно между фарфором и токоведущим стержнем остается воздушный зазор. В этом случае образуется система двухслойного цилиндрического конденсатора и напряженность на поверхности электрода меньшего радиуса определяется уравнением

$$E = \frac{U}{\varepsilon_{\text{в}} r \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{в}}} \ln \frac{r_1}{r} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{ф}}} \ln \frac{R}{r_1}\right)}, \qquad (1\text{-}184)$$

где $\varepsilon_{\text{в}}$, $\varepsilon_{\text{ф}}$ — диэлектрические проницаемости воздуха и фарфора;

r_1 — радиус внутренней полости фарфорового изолятора;

r — радиус стержня;

R — наружный радиус фарфорового изолятора.

Так как $\varepsilon_в < \varepsilon_ф$, то напряженность на поверхности стержня возрастает по сравнению с напряженностью на поверхности стержня изолятора без воздушного зазора. Пробивная напряженность воздуха меньше пробивной напряженности фарфора и определяется формулой

$$E_{пр} = 31\delta\left(1 + \frac{0{,}308}{\sqrt{r\delta}}\right) \text{ кв макс/см}, \qquad (1\text{-}185)$$

где δ — относительная плотность воздуха.

В этих условиях возможен пробой воздушной полости. Все напряжение после ее пробоя оказывается приложенным к фарфору, напряженность на внутренней поверхности фарфора повышается и может при определенных размерах r_1 и Δ достигнуть пробивных значений.

Для конструкции изолятора, применяемого в конденсаторе, недопустимы не только пробой воздушной полости, но и возникновение короны на поверхности стержня, т. е. напряженность E_r не должна превышать 10 *кв/см*.

Для исключения возможности возникновения пробоя воздушного зазора и коронирования на поверхности стержня целесообразно заполнить внутреннюю полость маслом. Пробивная напряженность при этом возрастает:

$$E_{пр} = 10\left(1 + \frac{11{,}7}{\sqrt{r}}\right) \text{ кв макс/см}. \qquad (1\text{-}186)$$

Пробивная напряженность и напряжение возникновения короны повышаются также при покрытии поверхности стержня несколькими слоями маслостойкого лака или несколькими слоями кабельной бумаги.

Расчет может также показать целесообразность металлизации внутренней поверхности изолятора. При контакте стержня с металлизированной поверхностью напряжение на воздушной прослойке становится равным нулю и возможность коронирования и пробоя воздушного зазора при этом полностью исключается.

Расчет изоляторов при постоянном напряжении

Значительная часть конденсаторов работает при постоянном напряжении, а данные об электрической прочности изоляторов в каталогах и справочниках приводятся только для переменного напряжения 50 *гц*.

В первом приближении разрядные расстояния на поверхности изоляторов можно определить по зависимости разрядного напряжения от расстояния в воздухе для системы электродов игла — игла или игла — плоскость. Эти зависимости приведены в курсах техники высоких напряжений.

У проходных изоляторов система электродов создает электрическое поле у поверхности изолятора, близкое к полю системы игла — игла. Амплитудные значения разрядных напряжений для этой системы при переменном токе достаточно близки к разрядным напряжениям при постоянном токе. Это позволяет при выборе изоляторов для работы при постоянном напряжении пользоваться данными об амплитудных значениях разрядных напряжений различных типов изоляторов при переменном напряжении.

Если система электродов изолятора ближе к системе игла — заземленная плоскость, то необходимо учитывать полярность электрода, приближающегося по форме к игле. В проходном изоляторе такими электродами являются крепежные части токоведущего стержня. При подаче на иглу отрицательного потенциала электрическая прочность воздушного промежутка примерно в 3 раза выше электрической прочности того же промежутка, когда на иглу подан положительный потенциал.

Так как в конденсаторах полярность выводов, как правило, не обозначается, то расчет следует вести для наихудшего случая и использовать кривую разрядных напряжений для системы положительная игла — заземленная плоскость. Одновременно нужно учитывать, что распределение напряжения по поверхности изоляции при постоянном напряжении определяется поверхностной проводимостью и поверхностные емкости на распределение напряжения не влияют.

Вследствие этого постоянное напряжение более равномерно распределяется по поверхности изолятора по сравнению с переменным, что приводит к небольшому, порядка 10—20%, повышению разрядного напряжения.

Таким образом, по кривым разрядного постоянного напряжения для промежутков игла — плоскость могут быть получены только ориентировочные данные для определения аксиального размера изолятора, работающего при постоянном токе. Эти данные должны проверяться экспериментально для вполне определенной формы разрядной поверхности изолятора и его электродов.

Определяя электрическую прочность в радиальном направлении при наличии воздушной полости в изоляторе, необходимо учесть, что при постоянном токе напряжения, приходящиеся на слои воздуха $U_в$ и фарфора $U_ф$, прямо пропорциональны сопротивлению этих слоев:

$$\frac{U_в}{U_ф} = \frac{\rho_в \ln \frac{r_1}{r}}{\rho_ф \ln \frac{R}{r}}, \tag{1-187}$$

где $\rho_в$, $\rho_ф$ — удельные объемные сопротивления воздуха и фарфора;

r — радиус токоведущего стержня;

r_1, R — внутренний и наружный радиусы фарфорового цилиндра.

Так как $\rho_в \gg \rho_ф$, то практически все приложенное напряжение приходится на воздушный слой. При малых толщинах этого слоя напряжение на нем может, даже при рабочем напряжении изолятора, достигнуть пробивного значения для воздуха. Хотя ток в этом случае ограничен последовательно включенным сопротивлением слоя фарфора, в полости будут все же происходить отдельные разряды, разрушающие изоляцию.

Как и при переменном напряжении, воздушную полость следует заполнить маслом или металлизировать.

Механический расчет изоляторов

Проходные изоляторы рассчитываются на изгиб силой, приложенной к краю верхней части изолятора. Опасным сечением является кольцевое сечение в месте заделки изолятора. Величина усилия, разрушающего изолятор, устанавливается техническими условиями на конденсатор. Если в технических условиях это усилие не оговорено, то следует воспользоваться данными ГОСТ 7273—54, в котором для проходных изоляторов на напряжении до 35 *кв* установлено для группы *А* (наиболее легкие условия механических нагрузок) разрушающее усилие $P = 375$ *кГ* *.

---

* В системе СИ усилие измеряется в ньютонах (*н*); для перевода в эти единицы усилие, выраженное в *кГ*, нужно умножить на 9,806.

Предел прочности на изгиб

$$\sigma_и = \frac{Ph}{W} \ кГ/см^2 \, ^*, \qquad (1\text{-}188)$$

где h — высота верхней части изолятора, *см*;

W — момент сопротивления кольцевого сечения изолятора,

$$W = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{R^4 - r^4}{R} \ см^3. \qquad (1\text{-}189)$$

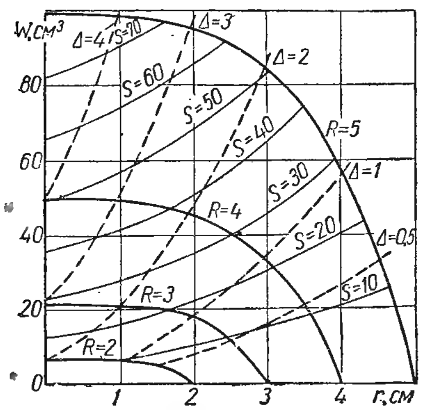


Рис. 53. Номограмма для определения момента сопротивления кольцевого сечения фарфорового изолятора с различными значениями внутреннего и наружного радиусов.

В табл. 7 даны расчетные пределы прочности на изгиб для фарфоровых изоляторов в зависимости от наружного радиуса и толщины стенки.

Таблица 7

Расчетные значения предела прочности на изгиб фарфоровых изоляторов

Наружный радиус изолятора R, *см*	Толщина стенки изолятора Δ, *см*	Допускаемый предел прочности на изгиб $\sigma_и$, *кГ/см²*
До 2,5	0,5—1,5	200,0
2,55—5	1,5—2,5	160,0
5,05—7,5	2,0—3,0	135,0

Для облегчения сравнения механических свойств изоляторов различных размеров на рис. 53 приведена номограмма для определения момента сопротивления W, площади сечения изолятора S и толщины его стенки Δ при различных значениях r и R. Номограмма используется и для выбора варианта оптимальных значений размеров r и R, приводящих к минимально возможному расходу материала изолятора, так как объем изолятора цилиндрической формы

$$V = SH \ см^3, \qquad (1\text{-}190)$$

где H — полная высота изолятора, *см*.

* В системе СИ механические напряжения измеряются в ньютонах на кв. метр ($н/м^2$). Для перевода в эту систему значение σ в $кГ/см^2$ нужно умножить на $9{,}806 \cdot 10^{-4}$.

Пользуясь совместно номограммой рис. 53 и данными рис. 52, можно выбрать наилучшие величины r и R, обеспечивающие электрическую прочность изолятора в радиальном направлении, его механическую прочность и минимальный расход материала.

Так, например, для изолятора с $U_н = 10$ *кв* по табл. 5 выдерживаемое (близкое к разрядному) напряжение при испытании на перекрытие равно 47 *кв*, а пробивное напряжение по толщине

$$U_{пр} = 1{,}3U_{пк} = 1{,}3 \cdot 47 = 61 \ кв.$$

Высота верхней части изолятора из формулы (1-174)

$$h = \frac{U_{пк} - 16}{2{,}5} = \frac{47 - 16}{2{,}5} = 12{,}4 \ см.$$

Рассмотрим два варианта:

1. Толщина стенки изолятора $\Delta = 1$ *см*; для нее из табл. 7 $\sigma_и = 200$ *кГ/см²*.

Разрушающее усилие принимаем 375 *кГ*, тогда

$$W = \frac{Ph}{\sigma_и} = \frac{375 \cdot 12{,}4}{200} = 23{,}2 \ см^2.$$

Из номограммы на рис. 53 для $\Delta = 1$ *см* и $W = 23{,}2$ *см³* получаем $r = 2{,}4$ *см* и $R = 3{,}4$ *см*, $S \cong 20$ *см²*, а из кривых на рис. 52 $U_{пр} = 68$ *кв*.

2. Аналогично при $\Delta = 2$ *см* $\sigma_и = 160$ *кГ/см²*, $W = 28$ *см³*, $r = 1{,}3$ *см*, $R = 3{,}3$ *см*, $S \cong 30$ *см²*, $U_{пр} = 69$ *кв*.

Оба варианта удовлетворяют условиям как механической, так и электрической прочности, практически равноценны по наружным размерам изолятора, однако во втором варианте расходуется фарфора в 1,5 раза больше, чем в первом. Полученное в обоих вариантах значение пробивного напряжения (68 и 69 *кв*) выше требуемого (61 *кв*). Следовательно, можно рассмотреть еще и третий вариант с $\Delta < 1$ *см*, позволяющий получить еще большую экономию материала изолятора.

Проходные изоляторы иногда необходимо применять и при конструировании герметизированных конденсаторов низкого напряжения, до 1500 *в* (включительно). В этом случае чаще всего применяют стеклянные проходные конденсаторы типов ИСШ, ИСК и ИСЦ, имеющие металлическую арматуру, рассчитанную на впайку изолятора в крышку конденсатора и запайку выводного проводника от секции конденсатора.

Если необходимо обеспечить особенно высокое сопротивление изоляции, например при изготовлении специальных

полистирольных конденсаторов, вместо стеклянных изоляторов применяют металлизированные керамические типа ИКП. При изготовлении радиоконденсаторов изоляторы ИКП применяются и при рабочем напряжении выше 2 *кв*. Недостатком стеклянных изоляторов, приводящим иногда к необходимости их замены на керамические металлизированные, является применение ферроникеля, т. е. магнитного материала для изготовления арматуры, вследствие чего повышается индуктивность.

Для конденсаторов с высокой рабочей температурой, превышающей 100° С, разработаны специальные керамические изоляторы типа ИКПТ на напряжения от 0,6 до 5 *кв*, у которых металлическая арматура рассчитана на соединение с крышкой конденсатора с помощью твердого припоя и на заварку выводного проводника от секции конденсатора в проходной металлической трубке изолятора.

§ 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНДЕНСАТОРА

Для оценки качества конденсатора и правильности выполнения его расчета и конструирования используют удельные характеристики, представляющие собой отношение одной из основных характеристик конденсатора к его объему или весу. Чаще всего применяют значения удельной емкости, удельной энергии и удельной реактивной емкости, отнесенные к единице объема: 1 $см^3$ или 1 $дм^3$ (1 *л*). Рассмотрим эти характеристики применительно к простейшему плоскому конденсатору, учитывая лишь активный объем диэлектрика, т. е. в данном случае не принимаются во внимание объем, занятый закраинами конденсатора, и объем его обкладок, а также объем, занятый конструктивным оформлением конденсатора.

Для оценки качества конденсаторов низкого напряжения обычно пользуются величиной удельной емкости

$$c_{уд} = \frac{C}{V}, \qquad (1\text{-}191)$$

где C — в *пф* и V — в $см^3$.

Подставляя значение C из выражения (1-43) и полагая $V = Sd$, где S — площадь обкладок, $см^2$, d — толщина диэлектрика, *см*, получаем

$$c_{уд} = \frac{0{,}0885 \varepsilon S}{Sdd} = 0{,}0885 \frac{\varepsilon}{d^2}\ пф/см^3. \qquad (1\text{-}192)$$

Если подставлять d в *мк*, то

$$c_{уд} = 8{,}85\frac{\varepsilon}{d^2}\ мкф/см^3. \qquad (1\text{-}192а)$$

При малых значениях рабочего напряжения конденсатора используется минимальная толщина диэлектрика $d_{мин}$, определяемая возможностями технологии его изготовления. В этих условиях величина $c_{уд}$ не зависит от рабочего напряжения. Когда рабочее напряжение достигает некоторого значения U', при котором уже приходится учитывать возможность пробоя конденсатора, то при дальнейшем увеличении напряжения необходимо увеличивать и толщину диэлектрика, а при этом удельная емкость снижается. Если заменить в выражении (1-192) толщину d отношением напряжения к допустимому значению напряженности поля E, то получим

$$c_{уд} = 0{,}0885\frac{\varepsilon E^2}{U^2}. \qquad (1\text{-}193)$$

Отсюда следует, что при напряжениях, больших U', величина $c_{уд}$ обратно пропорциональна второй степени рабочего напряжения, если принять в первом приближении, что значение E остается постоянным.

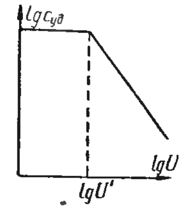


Рис. 54. Кривая зависимости удельной емкости от напряжения.

Таким образом, в области малых напряжений $c_{уд}$ не зависит от напряжения, а в области повышенных напряжений уменьшается с его ростом (рис. 54). Поэтому удельная емкость является удобной характеристикой качества для сравнения между собой различных типов конденсаторов только в области низких напряжений. При этом величина $c_{уд}$ определяется значениями ε и минимально достижимой толщины диэлектрика $d_{мин}$. Поскольку величина d входит в формулу (1-192) во второй степени, для получения максимальных возможных значений $c_{уд}$ при малых напряжениях обычно добиваются получения минимальных значений толщины диэлектрика при относительно небольших значениях ε. Рекордные значения удельной емкости удавалось получать до сих пор главным образом при изготовлении электролитических конденсаторов. При умеренных значениях ε оксидных слоев, порядка 10—25, толщину слоя

можно было получать значительно меньше 1 *мк*. В настоящее время для получения малой толщины диэлектрика при низком напряжении применяют также нанесение тонких слоев испарением в вакууме, катодным распылением, полимеризацией в газовом разряде и т. п. При этом получают значения $d_{мин}$ порядка долей микрона.

Другой путь получения высоких значений $c_{уд}$ — разработка диэлектриков со сверхвысокими значениями ε типа сегнетоэлектрической керамики. Однако для этих материалов трудно получить малые толщины диэлектрика: обычный нижний предел $d_{мин} = 100$ *мк*. Если при $\varepsilon = 10$, $d_{мин} = 1$ *мк* (например, для оксида алюминия), то при толщине 100 *мк* для получения того же значения $c_{уд}$ надо иметь значение $\varepsilon = 10 \cdot (100/1)^2 = 100\,000$. Такие значения можно получить только за счет резкого усиления зависимости ε от температуры и напряжения и резко увеличенных потерь энергии.

В настоящее время для конденсаторов постоянной емкости можно использовать сегнетокерамику со сглаженными зависимостями $\varepsilon = f(t°)$ и относительно приемлемыми потерями при значениях $\varepsilon = 2000 \div 3000$. Такие конденсаторы имеют меньшие величины $c_{уд}$, чем конденсаторы с оксидным или иным тонким диэлектриком.

Для оценки качества конденсатора высокого напряжения обычно используют величину удельной энергии

$$w_{уд} = \frac{W}{V} \ дж/л. \qquad (1\text{-}194)$$

Для конденсатора запасаемая энергия

$$W = \frac{CU^2}{2}, \qquad (1\text{-}195)$$

где W — в *дж*, C — в *ф*, U — в *в*.

Используя формулы (1-194) и (1-195), находим

$$w_{уд} = \frac{CU^2}{2V}. \qquad (1\text{-}196)$$

Заменяя $\frac{C}{V} = c_{уд}$ и используя выражение (1-192), вводя коэффициент 10^{-9}, учитывающий переход от фарад к пикофарадам и от сантиметров в кубе к литрам, получим

$$w_{уд} = 0{,}0442 \cdot 10^{-9} \frac{\varepsilon U^2}{d^2} = 0{,}442 \cdot 10^{-10} \ \varepsilon E^2, \qquad (1\text{-}197)$$

где $w_{уд}$ — в *дж/л* и E — в *в/см*.

Если подставлять значения E в *кв/мм*, то

$$w_{уд} = 0,442 \cdot 10^{-6}\ \varepsilon E^2. \qquad (1\text{-}198)$$

Следовательно, высокое значение удельной энергии, запасаемой в конденсаторе, можно получать за счет повышения ε и электрической прочности диэлектрика; увеличение E более эффективно, так как эта величина входит в выражение для $w_{уд}$ во второй степени. Следует также учесть, что сегнетокерамические материалы, обладающие сверхвысокими значениями ε, имеют относительно низкую электрическую прочность и для них значения E (допускаемая напряженность при длительной работе) обычно не превышают 1 *кв/мм*. Наиболее высокую прочность можно получить для оксидных слоев в электролитических конденсаторах, где значения E достигают величин порядка 500 *кв/мм*. Такие конденсаторы могут обеспечить наивысшие значения запаса энергии, но лишь при относительно небольших напряжениях — до 400—500 *в*, так как на большие напряжения электролитические конденсаторы не изготовляются. Поэтому при высоких рабочих напряжениях наибольшие значения удельной энергии можно получать для бумажных и пленочных конденсаторов, обеспечивающих высокие значения E при напряжениях до сотен киловольт.

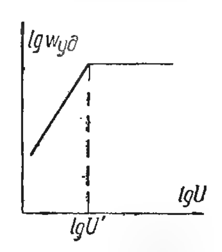


Рис. 55. Кривая зависимости удельной энергии от напряжения.

Если напряжение, прикладываемое к конденсатору, меньше U', соответствующего величине $d_{мин}$ для данного диэлектрика, то при дальнейшем снижении напряжения толщина диэлектрика уже не уменьшается и значение E падает, вызывая уменьшение $w_{уд}$ (рис. 55). Поэтому величина удельной энергии является удобной характеристикой качества конденсаторов при высоких напряжениях, когда она не зависит от рабочего напряжения (если принять $E = \text{const}$).

Для оценки качества конденсаторов с большой реактивной мощностью, применяемых при технической частоте, а также при средних радиочастотах, обычно используют величину удельной реактивной мощности

$$p_{уд} = \frac{P_р}{V}, \qquad (1\text{-}199)$$

выражаемую в *вар/см*³ или, что то же самое, в *квар/л*.

Принимая $\sin\varphi = 1$, запишем

$$P_p = U\omega C, \tag{1-200}$$

где U — в *в*, C — в *ф* и $\omega = 2\pi f$ при f — в *гц*.

Подставляя уравнение (1-200) в (1-199), получаем

$$p_{уд} = \frac{U^2 2\pi f C}{V}. \tag{1-201}$$

Заменяя $\frac{C}{V}$ на $c_{уд}$ по формуле (1-192) и вводя коэффициент 10^{-12} для перехода от пикофарад к фарадам, получаем

$$p_{уд} = 2\pi \cdot 0{,}0885 \cdot 10^{-12} \frac{U^2 f \varepsilon}{d^2} = 5{,}55 \cdot 10^{-13}\, \varepsilon E^2 f. \tag{1-202}$$

Следовательно, величина $p_{уд}$ зависит от частоты. Проанализируем эту зависимость для конденсатора с заданными размерами, т. е. при $V = \text{const}$. При этом надо иметь в виду, что для высокочастотных конденсаторов (а также в известных условиях и при более низких частотах) величина E будет зависеть от частоты, т. е. $E = F(f)$.

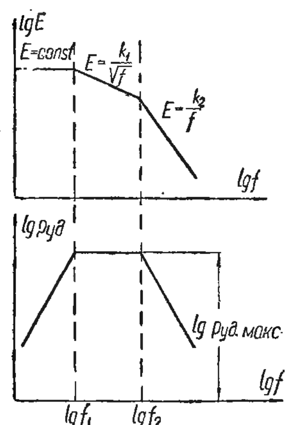


Рис. 56. Кривая зависимости допускаемой напряженности поля в диэлектрике конденсатора и удельной реактивной мощности от частоты.

В области низких частот, при f меньше некоторого значения f_1, величина E определяется только электрической прочностью, так как нагрев конденсатора еще невелик. В этой области частот $E = \text{const}$ и величина $p_{уд}$ линейно возрастает с частотой (рис. 56). При частотах выше f_1 становится заметным нагрев конденсатора, и с ростом частоты необходимо снижать E с таким расчетом, чтобы температура перегрева конденсатора Δt не превышала некоторого постоянного допускаемого значения. При этом полагаем, что до некоторого значения частоты f_2 можно считать величину $\operatorname{tg}\delta$ конденсатора не зависящей от частоты. При этом согласно уравнению (1-121)

$$E = \frac{U}{d} = \frac{1}{d}\sqrt{\frac{\alpha_т S_{охл} \Delta t}{2\pi f C \operatorname{tg}\delta}} = k\frac{1}{f}. \tag{1-203}$$

Здесь $\alpha_т$ — коэффициент теплоотдачи с поверхности конденсатора, *вт/см²·град*;

$S_{охл}$ — поверхность охлаждения конденсатора.

Таким образом, в диапазоне частот от f_1 до f_2 необходимо снижать E обратно пропорционально $\sqrt{f}$. В этом случае $E^2f = \text{const}$, а следовательно, и значение $p_{уд} = \text{const}$.

При частотах выше f_2 начинает проявляться зависимость tgδ конденсатора от частоты, обусловленная потерями в обкладках и выводах. В этом случае, в первом приближении, можно принять $\text{tg}\delta \approx \omega C r_м$, где $r_м$ — сопротивления металлических частей конденсатора. Подставляя это значение tgδ в выражение (1-203), получаем

$$E = \frac{1}{2\pi dC}\sqrt{\frac{\alpha_т S_{охл}\Delta t}{r_м}} \cdot \frac{1}{f} = k'\frac{1}{f}. \qquad (1\text{-}204)$$

Из этого выражения видно, что при частотах выше f_2 надо увеличивать скорость снижения E, с ростом частоты — уменьшать E обратно пропорционально первой степени f. В этом случае $p_{уд} = 5{,}55 \cdot 10^{-13}\varepsilon\frac{k'}{f}$ будет снижаться с ростом частоты, что графически показано на рис. 56.

Таким образом, величина $p_{уд}$ достигает максимального значения в диапазоне частот от f_1 до f_2. Найдем это максимальное значение, подставив в формулу (1-202) значение E из формулы (1-203) и используя выражение (1-53) для величины C,

$$p_{уд.\,макс} = 5{,}55 \cdot 10^{-13}\varepsilon f \frac{\alpha_т S_{охл}\Delta t d}{d^2 2\pi f \cdot 0{,}0885\varepsilon S\,\text{tg}\,\delta \cdot 10^{-12}} = \frac{\alpha_т S_{охл}\Delta t}{V\,\text{tg}\,\delta}. \qquad (1\text{-}205)$$

При заданном значении активного объема конденсатора $V = dS$ значение $p_{уд.\,макс}$ в оптимальном диапазоне частот определяется величинами коэффициента теплоотдачи, поверхности охлаждения и температуры перегрева, допустимой для данного типа диэлектрика. Величина максимальной удельной реактивной мощности тем больше, чем меньше tgδ конденсатора; от ε диэлектрика она не зависит. Таким образом, большие значения реактивной мощности (в соответствующем диапазоне частот) можно получать и для неполярных диэлектриков и даже для газов или вакуума.

Если принять, что для плоского конденсатора поверхность охлаждения будет в два раза больше поверхности обкладок, то выражение (1-205) можно представить в виде

$$p_{\text{уд}} = \frac{2\alpha_{\text{т}}\Delta t}{d \operatorname{tg} \delta}, \tag{1-206}$$

из которого следует, что удельная реактивная мощность будет возрастать с уменьшением толщины диэлектрика d.

Приведенные формулы для удельных характеристик учитывают только активный объем диэлектрика. Чтобы учесть в выражении для удельной емкости наличие закраин и объем обкладок, в формулу (1-192а) можно ввести поправочный коэффициент k:

$$c_{\text{уд}} = \frac{8{,}85}{k} \cdot \frac{\varepsilon}{d^2}, \tag{1-207}$$

где $c_{\text{уд}}$ — в *мкф/см*³ и d — в *мк*.

Для многопластинчатого плоского конденсатора с числом обкладок $M+1$ поправочный коэффициент

$$k = \left(1 + \frac{2\Delta l}{l} + \frac{2\Delta b}{b} + \frac{4\Delta l \Delta b}{lb}\right)\left[1 + \frac{(M+1)\, d_0}{Md}\right],$$

где l — активная длина обкладки;
b — ее активная ширина;
Δl — закраина в направлении длины;
Δb — закраина в направлении ширины обкладки;
d_0 и d — соответственно толщина обкладки и диэлектрика.

Для намотанного спирального конденсатора поправочный коэффициент

$$k = \left(1 + \frac{d_0}{d}\right)\left(1 + \frac{2\Delta b}{b}\right).$$

Для металлизированных конденсаторов в выражениях для поправочных коэффициентов можно принимать $d_0 \approx 0$, так как толщина обкладок обычно составляет доли микрона и $d_0 \ll d$.

В электролитических конденсаторах, в отличие от всех других типов конденсаторов, толщина диэлектрика много меньше толщины обкладки, т. е. $d_0 \gg d$. В этих конденсаторах одной из обкладок (имеется в виду обычный фольговый сухой тип) является анодная фольга (толщина d_a), а второй — волокнистая прокладка, пропитанная электролитом

(толщина $d_э$). Кроме того, катодная фольга, служащая выводом (толщина $d_к$), также увеличивает общую толщину обкладок. Суммарная толщина обкладки, приходящаяся на толщину оксидного слоя d с одной стороны анодной пластины,

$$d_о = d_э + 0{,}5\,(d_а + d_к).$$

Поскольку электролитические конденсаторы изготовляют намоткой, можно использовать выражение для k, соответствующее намотанному спиральному конденсатору. Применив формулу (1-207) и пренебрегая значением d^2 в сравнении с $d_о d$ (в данном случае $d < 1$ *мк*, а $d_о$ может быть порядка 50—100 *мк*), получаем

$$c_{уд} = \frac{8{,}85\varepsilon}{dd_о\left(1 + \frac{2\Delta b}{b}\right)},$$

где $c_{уд}$ — в *мкф/см*³, d и $d_о$ — в *мк*.

Толщина оксидного слоя пропорциональна формовочному напряжению $d = aU_ф$, где для алюминия $a = 1{,}55 \times 10^{-3}$ *мк/в* и для тантала $1{,}68 \cdot 10^{-3}$ *мк/в*. В соответствии с этим

$$c_{уд} = \frac{8{,}85\varepsilon}{aU_ф\,[d_э + 0{,}5\,(d_а + d_к)]\left(1 + \frac{2\Delta b}{b}\right)}, \qquad (1\text{-}208)$$

где $U_ф$ — напряжение формовки оксидного слоя.

Поскольку величина $c_{уд}$ входит в выражения для удельной энергии и для удельной реактивной мощности, можно внести необходимые уточнения и в значения $w_{уд}$ и $p_{уд}$, чтобы отразить в них наличие в конденсаторе закраин и обкладок конечной толщины.

Однако при этом не учитывается конструктивное оформление конденсатора, которое вызывает дополнительное увеличение объема, а потому даже расчет удельных характеристик с учетом закраин и обкладок приводит к значениям, практически соответствующим не размерам конденсатора, а объему конденсаторной секции до сборки ее в корпусе или до нанесения на нее защитного покрытия того или иного типа. Правильное значение удельной характеристики можно получить, разделив заданный параметр конденсатора (например, емкость) на значение объема, вычисленного по наружным размерам корпуса конденсатора.

Для оценки качества электролитических конденсаторов часто применяют величину удельного заряда

$$q_{уд} = \frac{Q}{V} = \frac{CU}{V} = \frac{8{,}85 \cdot 10^{-8} \frac{\varepsilon S}{d} Ed}{V} = \frac{8{,}85 \cdot 10^{-8} \varepsilon SE}{V}, \qquad (1\text{-}209)$$

где Q — в *мкк*, C — в *мкф*, U — в *в*, d — в *см*, S — в *см*², V — в *см*³, E — в *в/см* и $q_{уд}$ — в *мкк/см*³.

Из выражения (1-209) видно, что при заданном значении объема конденсатора его удельный заряд не зависит от рабочего напряжения, а потому является удобной характеристикой для сравнения конденсаторов различных типов.

После того как выполнен расчет конденсатора и установлены его наружные размеры, рекомендуется определить его удельные характеристики и сравнить их со значениями, известными из литературы или по заводским данным. Такое сравнение прежде всего покажет, не допущено ли при проектировании какой-либо грубой ошибки и приняты ли во внимание все возможности для улучшения удельных характеристик конденсаторов, свидетельствующие об экономии материалов, затрачиваемых на изготовление конденсатора, и о снижении его объема и веса в сравнении с ранее изготовлявшейся конструкцией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Багалей Ю. В., Расчет емкости пропитанных конденсаторов, «Изв. вузов СССР — Электромеханика», 1958, № 6.
2. Богородицкий Н. П., Волокобинский Ю. М., Таиров В. Н., Принципы конструирования высоковольтных высокочастотных изоляторов, Изв. ЛЭТИ им. Ленина, 1960, вып. XI.
3. Гоголицын Л. З., Определение потерь в конденсаторах при импульсном режиме, «Электричество», 1957, № 9.
4. Дашук П. Н., Расчет эквивалентных параметров высоковольтных конденсаторов, «Изв. вузов СССР — Энергетика», 1961, № 3.
5. Ерюхина З. В., К вопросу повышения напряжения теплового пробоя металлобумажных конденсаторов, ЖТФ, 1957, т. 27, № 9.
6. Залесский А. М., Бачурин Н. И., Изоляция аппаратов высокого напряжения, Госэнергоиздат, 1961.
7. Зингерман А. С., Определение пробивного напряжения по испытаниям образцов, «Электричество», 1950, № 3.
8. Зингерман А. С., Статистический метод определения пробивного напряжения, ЖТФ, 1948, т. 28, вып. 8.
9. Калантаров И. Л., Цейтлин Л. А., Расчет индуктивностей, Госэнергоиздат, 1955.
10. Казарновский Д. М., Потери в обкладках конденсаторов, «Изв. вузов СССР — Электромеханика», 1964, № 11.

11. Кучинский Г. С., Иркаева К. М., Индуктивность конденсаторов с рулонными секциями, «Вестник электропромышленности», 1961, № 11.
12. Лебедев Н. Н., Электрическое поле у края плоского конденсатора с диэлектрической прокладкой, ЖТФ, 1958, т. 27, № 6.
13. Лютов С. А., Индустриальные помехи радиоприему и борьба с ними, Госэнергоиздат, 1951.
14. Мантров М. И., Тепловой расчет бумажно-масляного конденсатора, собранного в металлическом баке, «Вестник электропромышленности», 1953, № 3.
15. Мантров М. И., Расчет пробивного напряжения бумажно-масляного конденсатора при тепловом пробое, «Вестник электропромышленности», 1953, № 8.
16. Ренне В. Т., Электрические конденсаторы, Госэнергоиздат, 1959.
17. Русин Ю. С., Метод приближенного расчета емкости, «Электричество», 1960, № 11.
18. Сачков Д. Д., Эйдлин Е. К., Расчет и конструирование радиоаппаратуры, Госэнергоиздат, 1957.
19. Справочник по электротехническим материалам, Под ред. Корицкого Ю. В. и Тареева Б. М., том I, ч. II, Госэнергоиздат, 1959.
20. Техника высоких напряжений, Под ред. Сиротинского Л. И., Госэнергоиздат, 1953.
21. Brooks H., The probable breakdown voltage of paper dielectric capacitors, «Trans. Amer. Inst. El. Eng.», 1947, v. 66.
22. Epstein B., Brooks H., The theory of extreme values and its implications in the study of the dielectric strength of paper capacitors, «J. Appl. Phisics», 1948, v. 19, № 6.
23. Gross B., Über dielectrische Verluste bei Periodischen Rechteckspannung, «Frequenz», 1958, Bd. 12, № 7.
24. Peyssou J., Condensateurs soumis a des impulsions de tension Prevision du echauffement, «Ann. Radio electr», 1956, v. 11, № 46.
25. Linder L., Schniedermann J., Eeinfluss der Eigeninduktiviat von Wickelkondensatoren auf ihrem Scheinwiderstand, «ETZ», 1939, № 29.
26. Reiten D. K., Accurate determination of the capacitance of rectangular parallel — plate capacitors, «J. Appl. Phisics», 1959, v. 30, № 2.
27. Whitman L. C., Whitmann W. W., Mathematics of insulation ageing calculation, «Communication Electronics», 1959, № 44.
28. Zaboklicki E., Przyblizona metoda obliczania mocy wydzielanej w kondensatorach linii sztucznych, «Przeglad Telekomunikacyiny», 1962, 34, № 4.

ГЛАВА 2

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ С НЕОРГАНИЧЕСКИМ ТВЕРДЫМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

§ 9. СЛЮДЯНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Слюда представляет собой природный неорганический диэлектрик, удобный для изготовления конденсатора благодаря способности легко расщепляться на тонкие слои, обладающие достаточно высокой электрической прочностью. При использовании калийной слюды мусковит — основного сорта применяемой в конденсаторостроении слюды — можно получать малые значения угла потерь [$\mathrm{tg}\,\delta = (1 \div 2)\ 10^{-4}$], относительно высокую диэлектрическую проницаемость ($\varepsilon = 7$) и малое изменение ε с температурой [$TK\varepsilon = (10 \div 20)\ 10^{-6}$ *град*$^{-1}$]. Поэтому слюду мусковит широко применяют для изготовления конденсаторов, несмотря на дороговизну, относительную дефицитность и необходимость применять ее в виде пластинок небольшой площади, что усложняет технологию изготовления слюдяных конденсаторов.

В современной технике в основном применяются слюдяные конденсаторы с малой реактивной мощностью, не превышающей 100—150 *вар* и с номинальной емкостью от нескольких десятков пикофарад до 0,05—0,1 *мкф*. В СССР подобные конденсаторы выпускаются в двух конструктивных оформлениях: опрессованные (тип КСО), рассчитанные на длительную работу при влажности до 80%, и герметизированные (тип КСГ), рассчитанные на длительную работу и хранение при влажности 100%.

Конденсаторы КСО опрессовываются пластмассой типа фенопласт, а конденсаторы КСГ собираются в металлических паяных корпусах, с использованием стеклянных изоляторов, впаянных в крышку. При малых емкостях применяется измененный вариант герметизации (тип СГМ): сборка в керамической овальной трубке с припайкой к ее торцам металлических колпачков. Все три типа конденсаторов изготовляются односекционными, а поэтому не могут применяться при высоких напряжениях переменного тока, хотя номинальные значения напряжения постоянного тока могут доходить у некоторых конденсаторов до нескольких киловольт.

Для изготовления слюдяных конденсаторов слюда мусковит нарезается в виде прямоугольных пластинок (слюда-шаблонка). Обычные размеры таких пластинок: 4 × 9, 7 × 14, 8 × 16, 12 × 20, 14 × 14, 10 × 20, 12 × 20, 19 × 25, 25 × 25, 10 × 30, 30 × 40, 38 × 38 и 40 × 50 *мм*.

Толщина пластинок составляет от 20 до 60 *мк*; пластинки толщиной 10 — 300 *мк* применяются для изоляции от корпуса. При повышенных напряжениях иногда заменяют одну пластинку большей толщины 2—3 пластинками меньшей толщины для повышения электрической прочности за счет ослабления влияния слабых мест в отдельных пластинках. Допускаемые значения напряженности электрического поля в слюдяных конденсаторах рассматриваемого типа (постоянное напряжение, длительная работа при температуре окружающей среды до 70° С) приведены в табл. 8.

Таблица 8

Рабочее номинальное напряжение постоянного тока и допускаемая напряженность в слюдяных конденсаторах при разной толщине и числе пластинок слюды между обкладками

Толщина пластинки, *мм*	Число пластинок между обкладками	Общая толщина диэлектрика, *мм*	Рабочее напряжение, *в*	Допускаемая рабочая напряженность, *кв/мм*
0,02	1	0,02	200—250	10—12,5
0,025	1	0,025	300—500	12—20
0,03	1	0,03	500—600	16,5—20
0,05—0,06	1	0,05—0,06	1000	16,5—20
0,03	2	0,06	1500	25
0,04	2	0,08	2000	25
0,05	2	0,10	3000	30
0,05	3	0,15	5000	33,3
0,15	1	0,15	3000	20

Испытательная напряженность поля при кратковременном испытании конденсаторов на пробой обычно равна удвоенной номинальной рабочей напряженности (испытательное напряжение берется равным двойному номинальному рабочему). При выборе закраин следует ориентироваться на величину испытательного напряжения.

Учитывая, что для пропитки рассматриваемого типа конденсаторов обычно применяется твердая пропиточная масса церезин, обладающая значительной усадкой при застывании и склонная к образованию раковин, закраины следует рассчитывать с учетом возможности перекрытия закраины в воздушной среде. Ориентировочно величину закраины можно найти по формуле (1-15), где коэффициент закраины $k_з = (1,5 \div 2)\, 10^{-3}$ *мм/в*.

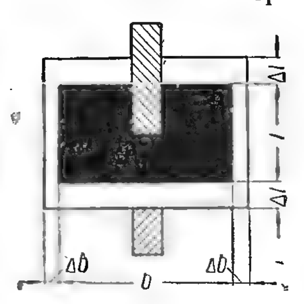


Рис. 57. Элементарная секция слюдяного конденсатора: обкладка зачернена, выводы заштрихованы.

Имеется в виду закраина Δl, прилегающая к выводу от обкладки (рис. 57). В этом случае путь разряда определяется шириной закраины. Закраину Δb можно взять меньшей, так как путь разряда в этом случае определяется примерно двойной шириной закраины. Обычно принимают Δb порядка $(0,6 \div 0,7)\, \Delta l$. При малых значениях рабочего (и испытательного) напряжения расчет по формуле (1-15) может дать такую малую закраину, что ее будет трудно осуществить технологически. В этом случае минимальное значение Δb и Δl принимается равным 0,5—0,7 *мм*.

При расчете конденсатора исходят из выбранного размера площади пластинок, определяя толщину пластинки по заданному номинальному рабочему напряжению постоянного тока. Установив размер закраин по величине испытательного напряжения, находят активную площадь одной пластинки и вычисляют ее емкость по формуле (1-44). Для посеребренной слюды можно принять $\varepsilon \approx 7$, так как между диэлектриком и обкладкой отсутствует воздушный зазор. При использовании обкладок из металлической фольги необходимо учитывать наличие воздушного зазора между слюдой и обкладкой, снижающего емкость. В зависимости от степени сжатия конденсаторной секции для расчета принимается эффективное значение $\varepsilon \approx 6 \div 6,5$.

Определив емкость одной пластинки слюды, находим число параллельно включенных пластинок, разделив заданное значение номинальной емкости конденсатора на емкость одной пластинки. Слюдяные конденсаторы малой реактивной мощности стандартизированы и при расчете надо ориентироваться на один из типоразмеров, предусмотренных соответствующим ГОСТ.

На рис. 58, 59 и 60 и в табл. 9 показаны наиболее распространенные типы слюдяных конденсаторов малой мощности.

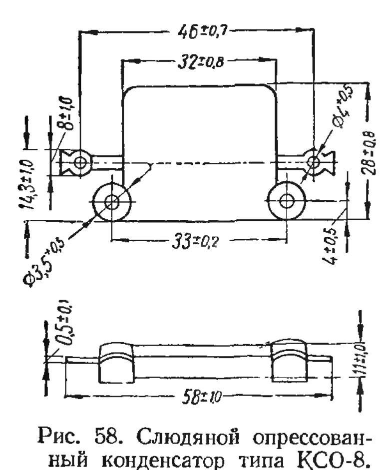


Рис. 58. Слюдяной опрессованный конденсатор типа КСО-8.

Таблица 9

Основные размеры конденсаторов типа СГМ

Размер, *мм*	Тип конденсатора			
	СГМ-1	СГМ-2	СГМ-3	СГМ-4
L	13	13	18	18
ΔL	±1,5	±1,5	±1,5	±1,5
$k_{макс}$	9,5	10	13,5	22
$S_{макс}$	6	7	7,5	9
l	30	30	30	40
Δl	±1	±1	±1	±1
m	0,4	0,4	0,4	0,5
n	2	2	2	2,5

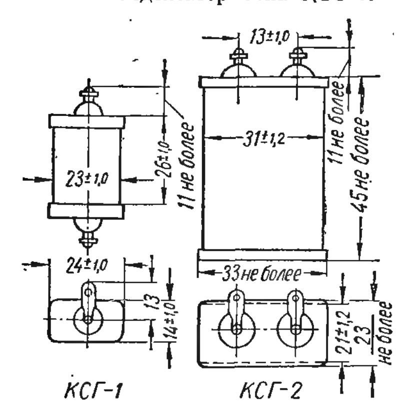


Рис. 59. Слюдяные герметизированные конденсаторы типа КСГ.

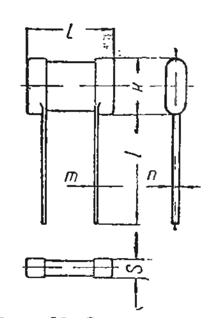


Рис. 60. Слюдяные герметизированные конденсаторы типа СГМ.

Если слюдяной конденсатор с заданным номинальным напряжением постоянного тока надо применять при переменном напряжении заданной частоты, то величину допускаемого напряжения можно определить из следующих соображений.

Прежде всего это напряжение должно быть таким, чтобы реактивная мощность конденсатора не превосходила допускаемого по ГОСТ значения, т. е. должно соблюдаться соотношение

$$P_{р} = U_{д}^{2} \omega C \leqslant P_{р.\,ном}.$$

Отсюда

$$U_{д} = \sqrt{\frac{P_{р.\,ном}}{\omega C}}$$

или амплитудное значение

$$U_{д} = 565 \cdot 10^{3} \sqrt{\frac{P_{р.\,ном}}{fC}}, \qquad (2\text{-}1)$$

где $U_{д}$ — в *в*, $P_{р.\,ном}$ — в *вар*, f — в *гц*, C — в *пф*.

При таком напряжении отсутствует опасный перегрев конденсатора, обусловленный диэлектрическими потерями. При высокой частоте возникает опасность нагрева конденсатора вследствие потерь в металлических частях, которые могут дополнительно возрасти за счет поверхностного эффекта. Поскольку потери в металлических частях определяются квадратом тока, потребляемого конденсатором, в ГОСТ предусмотрено определенное ограничение тока, допускаемого для конденсатора при высоких частотах,

$$I = \frac{K}{\sqrt[4]{f}}, \qquad (2\text{-}2)$$

где I — в *а*, f — в *Мгц*. Коэффициент $K=2$ для КСО-1, КСО-2 и КСО-5; $K = 4$ для КСО-6, КСО-7, КСО-8, КСО-11 и для КСГ-1 и КСГ-2; $K = 8$ для КСО-10, КСО-12 и КСО-13. Для конденсаторов СГМ такое ограничение не вводится в связи с тем, что они не изготовляются с большими значениями емкости. Для конденсаторов КСГ дополнительно указывается, что ток не должен превосходить 0,05 *а* на 100 *пф* емкости конденсатора.

Если известен допускаемый ток I, то допускаемое напряжение конденсатора при высокой частоте

$$U_{д} = \frac{I}{\omega C} = 1{,}59 \cdot 10^{5} \frac{I}{fC}, \qquad (2\text{-}3)$$

где $U_{д}$ — в *в*, I — в *а*, f — в *Мгц*, C — в *пф*.

Устанавливая допускаемое напряжение при повышенной или высокой частотах, надо ориентироваться на устранение возможности развития ионизации в конденсаторе, а также учитывать наличие эффекта мерцания в конденсаторах из посеребренной слюды, вследствие которого могут возникнуть дополнительные потери у края обкладок, а также небольшие колебания емкости. В связи с этим в ГОСТ предусмотрено дополнительное ограничение величины допускаемого переменного напряжения. Для конденсаторов типа КСО оно характеризуется данными табл. 10. Для конденсаторов типа КСГ допускается переменная составляющая при работе в цепях высокой частоты, амплитудное значение которой не превышает 10% номинального рабочего постоянного напряжения при емкостях до 910 *пф* включительно и 5% — при емкостях до 1000 *пф* и более.

Таблица 10

Допускаемые значения амплитуды переменного напряжения для слюдяных конденсаторов типа КСО

Номинальное напряжение, *в*	Допускаемая амплитуда переменного напряжения при частоте		
	до 500 *гц*	500 *гц*— 10 *кгц*	свыше 10 *кгц*
До 500	250 *в*	150 *в*	50 *в*
От 1000 до 3000	30%	20%	5%
» 5000 и выше	15%	10%	3%

Примечание. В таблице указаны проценты от соответствующего значения номинального рабочего напряжения постоянного тока. При работе в цепи пульсирующего напряжения сумма постоянной составляющей и амплитуды пульсации не должна превышать номинального рабочего напряжения постоянного тока.

Для конденсаторов типа СМГ допускаются следующие значения амплитуды переменного напряжения: при частоте до 500 *гц* — 250 *в*, 500 *гц* ÷ 10 *кгц* — 150 *в* и свыше 10 *кгц* — 50 *в*.

При установлении допускаемого значения переменного напряжения для проектируемого слюдяного конденсатора, основываясь на указанных ограничениях, приходится выбирать наименьшее из найденных значений напряжения. Оно может быть много меньше номинального напряжения постоянного тока, на которое был рассчитан конденсатор.

Пример. Рассчитать слюдяной конденсатор типа КСО-8 со следующими номинальными данными: номинальная емкость 4000 *пф*, номинальное напряжение 2000 *в* постоянного тока. Обкладки — серебро, нанесенное испарением в вакууме. Толщина таких обкладок не

более 1 *мк*. По данным табл. 8 выбираем толщину слюдяных пластинок $2 \times 0{,}04$ *мм*. Габаритные размеры конденсатора КСО-8 по рис. 58 32×33 *мм*. Размер слюды-шаблонки 25×25 *мм*. Испытательное напряжение $2 \times 2000 = 4000$ *в*. Принимая коэффициент закраины равным $2 \cdot 10^{-3}$, получаем размер закраины $\Delta l = 2 \cdot 10^{-3} \times 4000 = 8$ *мм*; закраина $\Delta b = 0{,}6 \cdot 8 = 4{,}8 \approx 5$ *мм*. Активная площадь пластинки слюды равна $(25 - 16) \cdot (25 - 10) = 9 \cdot 15 = 135$ *мм*^{2} $= 1{,}35$ *см*^{2}.

При использовании двух пластинок, сложенных вместе, с односторонним серебрением каждой, появляется зазор между непосеребренными сторонами пластинок. Поэтому принимаем $\varepsilon = 6{,}75$. По формуле (1-43) емкость пластинки

$$C_{\text{пл}} = 0{,}0885 \frac{1{,}35 \cdot 6{,}75}{0{,}08 \cdot 10^{-1}} = 100 \text{ пф.}$$

Число параллельно включенных единичных емкостей в конденсаторе

$$M = \frac{4000}{100} = 40.$$

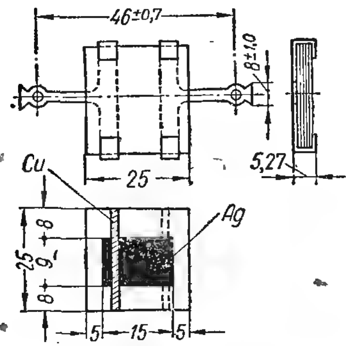


Рис. 61. Конструкция секции слюдяного конденсатора.

Конструкция секции конденсатора показана на рис. 61. Принимая толщину контактных полосок медной фольги 0,025 *мм* и толщину латунной обжимки, используемой для получения вывода, равной 0,5 *мм*, получаем общую толщину собранной секции

$$h = 40 \cdot 0{,}08 + 41 \cdot 0{,}025 + 41 \cdot 0{,}001 + 2 \cdot 0{,}5 = 5{,}266 \text{ мм},$$

т. е. размеры секции будут $25 \times 25 \times 6$ *мм*.

Такая секция свободно умещается в габаритные размеры конденсатора КСО-8 ($32 \times 28 \times 11$ *мм*) и слой опрессовочной пластмассы будет вполне достаточен для обеспечения требуемой степени влагозащиты. Внешний вид и размеры конденсатора показаны на рис. 58.

Рассчитаем для данного конденсатора допускаемое значение рабочего напряжения переменного тока в диапазоне частот от 1 *кгц* до 10 *Мгц*, используя формулы (2-1) — (2-3) и табл. 10. Номинальная активная мощность для конденсатора КСО-8 составляет 50 *вар*.

Результаты расчета приведены в табл. 11. В области частот до 300 *кгц* допускаемое напряжение определяется результатами, указанными в табл. 10, т. е. соображениями о необходимости предупреждения ионизации. В диапазоне от 300 *кгц* до 3 *Мгц* напряжение ограничивается результатами расчета по формуле (2-1), т. е. номинальной допускаемой реактивной мощностью, а при частотах 3 *Мгц* — ре-

Таблица 11

Результаты расчета допускаемых значений амплитуды переменного напряжения в широком интервале частот для конденсатора типа КСО-8, 4000 *пф*, 2000 *в*

По формуле (2-1)			По формулам (2-2) и (2-3)				По табл. 10
f, *гц*	$\sqrt{f}$	$U_д$, *в*	f, *Мгц*	$\sqrt[4]{f}$	I, *а*	$U_д$, *в*	$U_д$, *в*
10^3	31,6	1970	10^{-3}	0,178	22,5	890 000	400
10^4	100	632	10^{-2}	0,316	12,7	50 100	400
10^5	316	197	10^{-1}	0,560	7,1	2840	100
10^6	1000	63,2	1	1,0	4,0	159	100
10^7	3160	19,7	10	1,78	2,25	8,9	100

зультатами расчета по формуле (2-3), т. е. величиной допускаемого тока. При изменении номинальных емкости, напряжения и реактивной мощности результаты будут соответственно изменяться.

В данном (частном) случае при номинальном рабочем напряжении 2000 *в* постоянного тока и частоте 1000 *гц* допустимо амплитудное значение напряжения не более 400 *в*, а при частоте 10 *Мгц* — не более 8,9 *в*.

Аналогично рассчитываются конденсаторы КСГ и СМГ.

Слюдяные конденсаторы с большой реактивной мощностью, широко применявшиеся в радиопередающей аппаратуре и в контурах электротермических устройств, в настоящее время применяются уже редко. Это обусловлено тем, что в контурах мощных длинноволновых радиостанций они заменяются газонаполненными конденсаторами, а в контурах коротковолновых передатчиков и в высокочастотных электротермических устройствах — вакуумными и керамическими конденсаторами. Применяются слюдяные мощные конденсаторы сейчас только в некоторых видах радиолокационной аппаратуры.

Расчет слюдяных контурных конденсаторов рассмотрен в статье М. А. Жилинского.

§ 10. КЕРАМИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

При расчете керамических конденсаторов необходимо прежде всего установить эксплуатационные требования к температурной стабильности емкости, рабочему напряжению, силе и частоте тока, рабочей температуре, предельной влажности воздуха, а также требования в отношении

Таблица 12

Высокочастотные конденсаторные керамические материалы

Группа конденсаторов	Температурный коэффициент емкости конденсатора ТКЕ · 10^6 *град*$^{-1}$ в интервале температур 20—80° С	Изменение емкости конденсатора в интервале температур 20 ± 5° С, %	Диэлектрическая проницаемость ε при температуре 20 ± 80° С	Тангенс угла диэлектрических потерь tg δ · 10^4 при частоте 1 *Мгц* и температуре 100° С, не более	Удельное объемное сопротивление при температуре 150° С, *ом · см* не менее,	Электрическая прочность, *кв/мм*, не менее	Керамика
М1500	—1500 ± 200	~ ± 10	130—150	10	10^{10}	6	Перовскитовая
М750	—750 ± 100	~ ± 6	70—75	8	10^{11}	8	Рутиловая (ε = 75), цирконатовая (ε = 70)
М470	—470 ± 90	~ ± 4	40—45	8	10^{11}	8	
М330	—330 ± 60	~ ± 2,5	40—45	8	10^{11}	8	
М220	—220 ± 40	~ ± 2	35—45	8	10^{11}	8	Титано-циркониевая, цирконатовая
М150	—150 ± 40	~ ± 1	35—45	8	10^{11}	8	
М75	—75 ± 30	~ ± 0,5	30—40	8	10^{11}	8	
М47	—47 ± 20	< ± 0,5	18—40	8	10^{11}	8	Станнатная (ε = 18), титано-циркониевая (ε = = 23), лантанатовая (ε = 40)
М33	—33 ± 20	< ± 0,5	18	8	10^{11}	8	Станнатная
МПО	—0 ± 20	0	16	8	10^{11}	8	»
П33	+33 ± 20	< ± 0,5	16	8	10^{11}	8	»
П60	+60 ± 20	< ± 0,5	7	8	10^{11}	20	Цельзиановая

Таблица 13

Низкочастотные конденсаторные керамические материалы

Группа конденсаторов	Изменение емкости конденсатора в интервале температуры от —60 до +85° С по отношению к емкости при 20 ± 2° С, %	Диэлектрическая проницаемость ε при температуре 20 ± 2° С, не менее	Тангенс угла диэлектрических потерь tg δ · 10^4 при частоте 1000 *гц* и температуре 20 ± 2° С, не более	Удельное объемное сопротивление при температуре 85 ± 2° С, *ом · см*, не менее	Электрическая прочность, *кв/мм*, не менее	Максимальное изменение емкости конденсатора, %, при увеличении напряженности постоянного поля от 0,05 до		Основной компонент керамики
						1 *кв/мм*	0,5 *кв/мм*	
Н50	±50	900	20	10^{11}	6	—	—	Стронций — висмут — титанат
Н20	±20	1000	200	10^{11}	5	10	—	Титанат бария
Н30	±30	2000	200	10^{11}	5	20	—	Титанат бария
Н50	±50	3500	250	10^{11}	4	30	—	Титанат бария
Н90	±90	8000	250	10^{10}	3	—	30	Титанат бария

надежности. Исходя из этих данных, выбирается материал диэлектрика (вид керамики), оптимальная конструкция и определяются геометрические размеры — площадь электродов, толщина стенки, разрядные промежутки, число элементов в случае многослойных конденсаторов или конденсаторов-блоков.

В зависимости от материала и конструкции керамические конденсаторы классифицируются следующим образом:

1. По частотному диапазону:

а) высокочастотные, изготовляемые из керамики с очень малыми диэлектрическими потерями и заданным температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости (ТКε);

б) низкочастотные, изготовляемые из керамики с очень высокой диэлектрической проницаемостью.

2. По величине рабочего напряжения:

а) низкого напряжения;

б) высокого напряжения.

3. По конструкции:

а) постоянной емкости — трубчатые открытого типа и герметизированные, пластинчатые однослойные и многослойные, рулонные, многосекционные, стержневые, боченочные, кольцевые, горшковые, проходные, опорные;

б) подстроечные — плоские и цилиндрические.

Боченочные, стержневые, кольцевые и горшковые конденсаторы выполняются только на высокие напряжения, а многослойные, многосекционные и герметизированные — только на низкие.

В табл. 12 и 13 приведена классификация керамических материалов, применяемых для изготовления конденсаторов различных типов.

Керамические конденсаторы низкого напряжения

Для низкочастотных конденсаторов, как видно из табл. 12 и 13, допускается значительно большее изменение емкости в интервале рабочих температур, чем для конденсаторов высокочастотных.

Изменение емкости высокочастотного конденсатора в том или ином интервале рабочих температур подсчитывается по формуле $\text{ТКЕ} = \frac{\Delta C}{C\Delta t}$. Если принять, что среднее значение

ТКЕ конденсаторов из рутиловой керамики в интервале температур 20—80° С составляет $750 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$, то изменение емкости

$$\frac{\Delta C}{C} 100 = -60 \cdot 100 \cdot 750 \cdot 10^{-6} = -4{,}5\%.$$

ТКЕ керамического конденсатора, предназначаемого в качестве контурного, регламентируется более жестко, чем, например, высокочастотного разделительного конденсатора.

Температурный коэффициент емкости конденсатора в первом приближении связан с особенностями материала диэлектрика и электродов следующим образом:

$$\text{ТКЕ} \approx \text{ТК}\varepsilon + 2\alpha_э - \alpha_д, \qquad (2\text{-}4)$$

где $\alpha_э$ и $\alpha_д$ — соответственно коэффициенты линейного расширения материала электродов и диэлектрика;

ТКε — температурный коэффициент диэлектрической проницаемости.

Электроды керамических конденсаторов, закрепляемые на поверхности керамики вжиганием, настолько прочно сцеплены с диэлектриком, что можно принять $\alpha_э = \alpha_д$, тогда

$$\text{ТКЕ} = \text{ТК}\varepsilon + \alpha_д. \qquad (2\text{-}5)$$

Поскольку температурный коэффициент линейного расширения керамических диэлектриков мал (обычно находится в пределах $6 \cdot 10^{-6} - 10 \cdot 10^{-6}$), то для конденсаторов с абсолютным значением ТКЕ, превышающим $30 \cdot 10^{-6}$, принимается ТКЕ $\approx$ ТКε.

Как правило, изменение емкости керамических конденсаторов с температурой является заданной величиной, оговариваемой потребителем при оформлении заказа на данную партию изделий. Однако требования к ТКЕ конденсатора не всегда однозначно предопределяют выбор керамического материала. Так, например, при повышенных напряженностях электрического поля для изготовления конденсаторов группы М 750 категории 1 (интервал рабочих температур от — 60 до + 155° С по ГОСТ 7159—61) следует применять керамику на основе титаната циркония, а для изготовления конденсаторов той же группы, но категории 3 (интервал температур от — 60 до + 85° С), — рутиловую керамику.

Допускаемая напряженность электрического поля для трубчатых и дисковых керамических конденсаторов в зависимости от температуры устанавливается согласно данным рис. 62. Из этого рисунка видно, что каждый материал характеризуется критической температурой, выше которой рабочая напряженность поля резко снижается. Толщина стенки конденсатора на участке кривой, где напряженность поля зависит от температуры, определяется химической формой пробоя (электровосстановительные процессы в диэлектрике, миграция металла из электрода в диэлектрик).

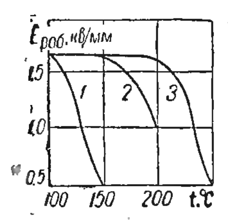


Рис. 62. Кривые зависимости допускаемой напряженности электрического поля от температуры для конденсаторов типов КТК и КДК с серебряными обкладками и тремя разными диэлектриками:

1 — рутиловая керамика Т-80; *2* — титано-циркониевая керамика Т-40; *3* — беститановая керамика (корундовая, станнатная или цирконатовая).

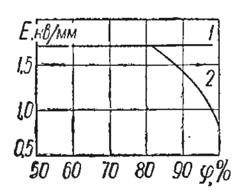


Рис. 63. Кривые зависимости допускаемой напряженности электрического поля от относительной влажности воздуха для конденсаторов типа КТК и КДК с серебряными обкладками и двумя разными диэлектриками:

1 — беститановая керамика; *2* — рутиловая керамика Т-80. Постоянное напряжение.

Из рис. 63 видно, что значение градиента постоянного электрического поля керамических конденсаторов зависит не только от окружающей температуры, но и от относительной влажности воздуха. Длительное воздействие высокой влажности и конденсация влаги на поверхности конденсатора практически могут наблюдаться в условиях субтропического и тропического климата.

Эксплуатационная надежность конденсаторов открытого типа в условиях высокой влажности повышается, если электроды выполнены из палладия или платины. Герметизированные конденсаторы с серебряными электродами могут использоваться в условиях высокой влажности без снижения градиента электрического поля. Однако следует учитывать, что герметизированные конденсаторы отличаются более сложной технологией, чем конденсаторы открытого типа.

При форсированных эксплуатационных режимах (высокая рабочая температура, высокая относительная влажность воздуха), как следует из рис. 62 и 63, особенно невыгодны конденсаторы из рутиловой керамики. Ввиду недефицит-

ности сырья и простоты технологии рутиловая керамика все же широко используется для изготовления конденсаторов, предназначаемых для менее жестких эксплуатационных условий.

Емкость керамических конденсаторов после воздействия температурных циклов изменяется в пределах погрешности определения малых изменений емкости, а потому, в отличие от слюдяных и ряда других конденсаторов, трудно говорить о необратимом изменении их емкости. Однако при определенных градиентах электрического поля в конденсаторах, вполне удовлетворяющих требованиям в отношении цикличности, обнаруживается эффект мерцания. Этот эффект проявляется в том, что в приемной аппаратуре высокого класса возникают шумы и трески, а в генераторе, в контур которого включен мерцающий конденсатор, возникают неожиданные скачки частоты, достигающие 10—100 *гц* и более. Явление мерцания не связано с процессами в диэлектрике и обусловливается дефектами тонкого серебряного слоя. Эффект мерцания наблюдается в конденсаторах самых различных типов — слюдяных, стеклоэмалевых и других, имеющих в качестве электродов металлический слой, нанесенный вжиганием или распылением. Явление мерцания отсутствует у конденсаторов со сплошными электродами из фольги.

При осмотре посеребренной поверхности керамики с помощью микроскопа, а иногда и невооруженным глазом, обнаруживаются участки малой толщины с обособленными частицами металла. В связи с процессами автоэлектронной эмиссии, электрическое сопротивление этих участков непостоянно, что является причиной хаотичности явления в целом.

Эффект мерцания вызывает также увеличение $\operatorname{tg}\delta$. Из рис. 64 видно, что при существующем способе серебрения трубчатых керамических конденсаторов процесс мерцания наблюдается при очень малой напряженности высокочастотного поля. Поэтому при жестких требованиях к стабильности емкости конденсатора необходимо применять специальные конструкции конденсаторов, рассчитанные на напряженности поля, отвечающие данным рис. 64, т. е. не превышающие 100—200 *в/мм* высокой частоты. При малых значениях емкости целесообразно использовать дисковые конденсаторы взамен трубчатых. Металлизация с четким ровным краем может быть осуществлена в этом случае

сравнительно просто, а напряженность поля на зазоре меньше, в связи с большой толщиной диэлектрика.

С точки зрения конструктивного оформления и в тесной связи с технологией изготовления можно выделить четыре основных типа керамических конденсаторов постоянной емкости.

1. Трубчатый конденсатор, получаемый протяжкой заготовок через мундштук (КТ — керамический трубчатый, КТМ — керамический трубчатый малогабаритный).

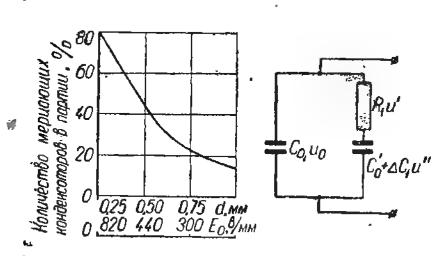


Рис. 64. Кривая зависимости относительного количества брака по мерцанию в партии конденсаторов типа КТК группы № 750 от толщины стенки и напряженности поля. Справа — эквивалентная схема мерцающего конденсатора.

2. Плоский конденсатор, однослойный или многослойный, получаемый прессованием, штампованием или литьем пленки (КД — керамический дисковый, КП — керамический пластинчатый, КПС — керамический пластинчатый сегнетоэлектрический, КПМ — керамический пластинчатый малогабаритный).

3. Монолитный конденсатор, плоский или рулонный, получаемый литьем пленки с последующим нанесением на эту пленку палладиевой пасты и обжигом пакета при высоких температурах (КМ — керамический монолитный).

4. Многосекционный конденсатор, получаемый горячим литьем заготовок (КЛС — керамический литой секционный).

Применение этих четырех конструкций конденсаторов объясняется разными их показателями в отношении удельной емкости, величины рабочего напряжения, эксплуатационной надежности. Как видно из табл. 14, наиболее высокой удельной емкостью отличаются монолитные конденсаторы, наиболее высоким рабочим напряжением — конденсаторы трубчатые типа КТ и дисковые (пластинчатые) типа КД.

Эксплуатационная надежность оценивается значением интенсивности отказов λ, устанавливаемой для каждого типа и вида конденсаторов применительно к тому или иному эксплуатационному режиму [см. формулу (1-3)].

Таблица 14

Основные характеристики керамических конденсаторов низкого напряжения

Конструктивное оформление	Условные обозначения	Толщина стенки, *мм*	Минимальный разрядный промежуток, *мм*	Рабочее напряжение, *в*	Удельная емкость для диэлектрика с $\varepsilon = 3000$, *мкф/см*^{3}
Трубчатый	КТ	0,31—1	2	500	0,05
	КТМ	0,25—0,50	1	250	0,09
Пластинчатый	КД	0,6—3	1,5	500	0,04
	КП	0,4—0,6	1,5	250	—
	КПС	0,4—0,6	1,5	250	0,08
Монолитный	КМ	~0,1—0,15	0,1—0,15	100—250	0,24
Многосекционный	КЛС	~0,15—0,3	0,15—0,3	35—125	0,14

При рабочей температуре 85° С и напряжении 500 *в* интенсивность отказов λ для конденсаторов КТ-1 группы М750 составляет 0,2 10^{-5} $ч^{-1}$. Для конденсаторов группы МПО или П120 величина λ значительно меньше.

Толщина стенки керамических конденсаторов низкого напряжения зависит не только от кратковременной, но и от долговременной электрической прочности, от интенсивности процессов старения керамики. Вместе с тем толщина стенки ограничена технологическими возможностями и механической прочностью керамики.

При уменьшении толщины стенки трубчатых конденсаторов, изготовляемых протяжкой через мундштук, ниже определенного предела увеличивается их овальность. Этот дефект проявляется тем больше, чем больше диаметр трубчатого конденсатора. Так, например, трубчатый конденсатор диаметром 6 *мм* должен иметь стенку не тоньше 0, 5 *мм*, а конденсатор диаметром 4 *мм* может иметь стенку толщиной 0,25 *мм*. Диаметр дисковых конденсаторов низкого напряжения, изготовляемых прессованием или штампованием, также ограничен, так как при чрезмерном его увеличении, но при неизменной толщине стенки, снижается механическая прочность, а также затрудняется получение заготовок с плоскопараллельными торцами ввиду деформации при обжиге. Удельная емкость высокочастотных керамических конденсаторов низкого напряжения в зависимости от конструкции и материала диэлектрика находится в пределах от 50 до 15 000 *пф/м*^{3}; для низкочастотных конденсаторов, изготовляемых из керамики с очень высокой диэлектриче-

ской проницаемостью, предельное значение удельной емкости составляет 500 000 *пф/см*³. Тонкостенные конденсаторы трубчатой конфигурации, несмотря на наличие сквозного канала, не заполненного диэлектриком, обладают удельной емкостью более высокой, чем одинарные дисковые.

Рассмотрим в качестве примера данные об удельной емкости однослойных керамических конденсаторов, диэлектриком которых служат материалы с $\varepsilon = 7$ и $\varepsilon = 150$.

Для пластинчатой конфигурации [см. формулу (1-192)]:

$$c_{\text{уд}1} = 8{,}85 \cdot 10^{-2} \frac{7}{0{,}1 \cdot 0{,}1} = 62 \ \textit{пф/см}^3;$$

$$c_{\text{уд}2} = 8{,}85 \cdot 10^{-2} \frac{150}{0{,}1 \cdot 0{,}1} = 1330 \, \textit{пф/см}^3,$$

для трубчатой конфигурации соответственно 160 и 3200 *пф/см*³. Изменение толщины диэлектрика в большей степени сказывается на удельном значении емкости плоских конденсаторов, так как объем трубчатых конденсаторов определяется не толщиной, а наружным диаметром трубки. Концентрическое расположение трубчатых конденсаторов мало сказывается на удельной емкости, так как с увеличением диаметра трубки приходится увеличивать толщину стенки. Многослойные плоские конденсаторы имеют очень большую удельную емкость — до 8000 *пф/см*³ для рутиловой керамики ($\varepsilon = 75$), до 0,25 *мкф/см*³ для сегнетокерамики ($\varepsilon = 4000$). Многослойные пленочные и монолитные конденсаторы отличаются очень малой толщиной стенки — 0,1 ÷ 0,2 *мм*. Для самых различных типов и конструкций керамических конденсаторов общими элементами являются: материал диэлектрика — высокочастотная или низкочастотная конденсаторная керамика; материал электрода — серебро, палладий; электрические контакты — выводы из медной облуженной проволоки диаметром 0,4—0,8 *мм* или специальная арматура (лепестки, гайки, втулки), которая паяется при помощи свинцово-оловянного припоя с добавкой серебра. Защитное покрытие, как правило,— глифталемасляные эмали или специальные компаунды.

Площадь серебрения конденсаторов устанавливается в зависимости от номинала емкости, толщины стенки и диэлектрической проницаемости материала. Краевую емкость в плоском конденсаторе, у которого площадь электрода совпадает с площадью диэлектрика, можно учесть формулой (1-58).

Если диаметр конденсатора $D = 3$ *см*, толщина диэлектрика $d = 0{,}2$ *см*, то краевая емкость составляет $\sim 0{,}4$ *пф*. При величине диэлектрической проницаемости диэлектрика $\varepsilon = 20$, когда емкость конденсатора ~ 60 *пф*, краевая емкость составляет 0,6%, т. е. меньше погрешности измерений. Однако, если емкость конденсатора мала, влияние краевого эффекта необходимо учитывать.

В случае несовпадения краев электродов с краями диэлектрика емкость конденсатора с известным приближением определяется выражениями (1-58) для плоского конденсатора и (1-59) для трубчатого.

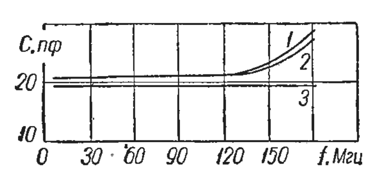


Рис. 65. Кривые зависимости емкости керамических конденсаторов от частоты:

1 — трубчатый конденсатор при длине выводов 5 *мм*; *2* — то же, при длине выводов 1,5 *мм*; *3* — дисковый конденсатор при длине выводов 5 *мм*.

Частотный предел многих видов керамических конденсаторов низкого напряжения не превышает 50—100 *Мгц*. Предел по частоте таких конденсаторов определяется величиной $\operatorname{tg}\delta$ керамического материала при сверхвысоких частотах, а также индуктивным сопротивлением выводов, согласно известным соотношениям для частоты емкости и индуктивности. Индуктивность керамических конденсаторов складывается из индуктивности электродов и индуктивности выводов, которая подсчитывается по формуле (1-71). При равных размерах выводов плоский конденсатор, с точки зрения индуктивности, выгоднее трубчатого.

На рис. 65 приведены кривые зависимости кажущейся емкости трубчатых и дисковых конденсаторов низкого напряжения от частоты. Кажущаяся емкость возрастает с частотой в соответствии с увеличением индуктивного сопротивления конденсатора, особенно при большой емкости, согласно выражению (1-63).

Кажущаяся емкость керамического конденсатора при частоте 10^8 *гц*, если его истинная емкость составляет 36 *пф*, а индуктивность 0,02 *мкгн* (при длине вывода ~ 10 *мм*),

$$C_{\text{каж}} = \frac{36 \cdot 10^{-12}}{1 - 40 \cdot 10^{16} \cdot 2 \cdot 10^{-8} \cdot 36 \cdot 10^{-12}} \approx 50 \text{ пф}.$$

Таким образом, кажущаяся емкость конденсатора при частоте 10^8 *гц* превышает истинную в 1,4 раза.

Для частот свыше 50 *Мгц* рекомендуется применять конденсаторы специальной конструкции — дисковые с плоскими укороченными выводами. Этот тип конденсаторов с особо малой индуктивностью обозначается КДУ (конденсатор дисковый для ультраволновой аппаратуры).

При проектировании керамических конденсаторов, рассчитанных на использование при пониженном атмосферном давлении, следует учитывать резкое снижение напряжения поверхностного перекрытия. На рис. 66 представлены кривые зависимости разрядного напряжения от расстояния между электродами при разных атмосферных давлениях.

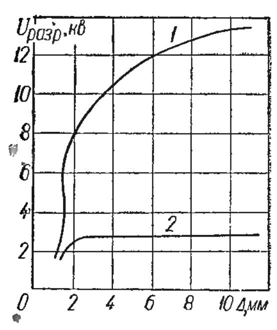


Рис. 66. Кривые зависимости напряжения перекрытия (разрядного напряжения) по поверхности чехла герметизированного конденсатора от расстояния при различных атмосферных давлениях:

1 — 760 *мм рт. ст*; *2* — 120 *мм рт. ст.*

Пример. Выбрать материал и конструкцию керамического контурного конденсатора низкого напряжения, а также рассчитать размеры заготовки до и после обжига и площадь электродов, если даны: номинальная емкость $C = 10$ *пф*; допускаемое отклонение емкости от номинальной $\pm$ 5%; группа по ТКЕ № 750; рабочее напряжение постоянного тока 500 *в*; рабочее напряжение высокой частоты $U_{в.\,ч} = 25$ *в* при предельной частоте 500 *Мгц*; интервал рабочих температур от -60 до $+150°$ С; особое условие — мерцание емкости не допускается.

Требованию к ТКЕ отвечают рутиловая керамика $\varepsilon = 75$ или керамика на основе титаната и цирконата кальция $\varepsilon = 70$ (табл.12) Как следует из рис. 62, допускаемая напряженность поля для рутиловой керамики при температуре 150° С составляет 500 *в/мм*, а для керамики на основе соединений кальция — 1700 *в/мм*. В первом случае толщина стенки

$$d \geqslant \frac{500}{500} \geqslant 1 \text{ мм},$$

во втором —

$$d \geqslant \frac{500}{1700} \geqslant 0{,}3 \text{ мм}.$$

Поскольку емкость конденсатора мала и, следовательно, даже при повышенной толщине стенки площадь обкладки будет также мала, выбираем для изготовления конденсатора наиболее простой по техно-

логии материал — рутиловую керамику. При этом учитывается, что конденсаторы из рутиловой керамики с толщиной стенки около 1 *мм* более надежны в отношении мерцания емкости, чем конденсаторы с толщиной стенки 0,3 *мм*. Из соображений о минимальной индуктивности выбираем конфигурацию конденсатора в виде диска.

Разрядный промежуток для дискового конденсатора на рабочее напряжение 500 *в* согласно табл. 14 должен быть не менее 1,5 *мм*. Очевидно, диаметр электродов дискового конденсатора с толщиной стенки 1 *мм* из условия о разрядном промежутке должен быть по крайней мере на 0,5 *мм* меньше, чем диаметр диска. Однако электрическое поле конденсатора, у которого край электродов не совпадает с краем торца, резко неоднородно. С целью получить однородное электрическое поле и обеспечить в возможно большей степени эксплуатационную надежность конденсатора, в частности в отношении эффекта мерцания, принимаем толщину стенки 1,5 *мм*. Такая стенка предопределяет вполне приемлемый разрядный промежуток; площадь электродов при этом может совпадать с площадью торца диска.

Из выражений (1-43) и (1-45) определим диаметр диска без учета краевой емкости

$$D = \sqrt{\frac{Cd}{0{,}0694\varepsilon}} = \sqrt{\frac{10 \cdot 0{,}15}{0{,}0694 \cdot 75}} = 0{,}54 \ \textit{см}.$$

Согласно ГОСТ 7159—61 дисковые керамические конденсаторы могут иметь диаметр 5 или 6 *мм*. Если принять диаметр 5 *мм*, то емкость без учета краевого эффекта

$$C_{\text{д}} = 0{,}0694 \frac{75 \cdot 0{,}25}{0{,}15} \simeq 8{,}6 \ \textit{пф}.$$

Краевая емкость согласно формуле (1-57)

$$C_{\text{к}} = 1{,}5 \frac{0{,}15}{0{,}5} \left[\ln \left(25 \frac{0{,}5}{0{,}15} \right) - 1{,}305 \right] = 1{,}4 \ \textit{пф}.$$

Суммарная емкость

$$C = C_{\text{д}} + C_{\text{к}} = 8{,}6 + 1{,}4 = 10{,}0 \ \textit{пф}.$$

Напряженность высокочастотного поля

$$E_{\text{в. ч}} = \frac{U_{\text{в. ч}}}{d} = \frac{2{,}5}{1{,}5} = 16{,}7 \ \textit{в/мм}.$$

Очевидно, мерцание емкости при таком незначительном градиенте высокочастотного поля исключено.

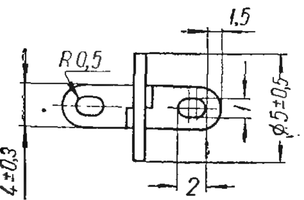
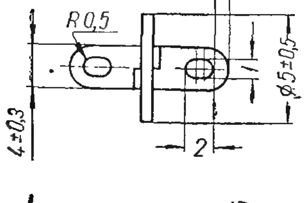
Согласно ГОСТ 7159—61 реактивная мощность дискового конденсатора диаметром 5 *мм* не должна превышать 30 *вар*. В рассматриваемой конструкции

$$P_p = U^2 \omega C = 625 \cdot 6{,}28 \cdot 500 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 10^{-12} = 19{,}6 \ \text{вар}.$$

В заключение определим размеры керамической заготовки до обжига.

Для рутиловой керамики коэффициент усадки при обжиге заготовок, получаемых прессованием, составляет $\approx 1{,}15$. В таком случае диаметр прессованной заготовки должен быть $5 \cdot 1{,}5 = 5{,}75$ *мм*, а высота $1{,}5 \times \times 1{,}15 = 1{,}72$ *мм*.

Чертеж конденсатора приведен на рис. 67.

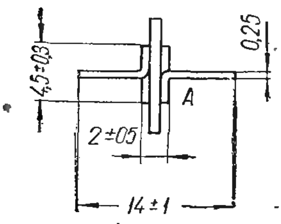


Рис. 67. Дисковый керамический конденсатор для СВЧ диапазона:

$C = 10$ *пф*, $U_н = 500$ *в*; *А* — место пайки припоем свинцово - оловянно - серебряным ПСР-2; поверхность конденсатора и отогнутые части вывода покрываются красной эмалью.

Керамические конденсаторы высокого напряжения

Керамические конденсаторы высокого напряжения подразделяются на две основные группы.

1. Конденсаторы, рассчитанные на воздействие постоянного напряжения (например, анодно-разделительные), промышленной, звуковой частоты и видеоимпульсов.

2. Конденсаторы, рассчитанные на воздействие высокого напряжения высокой частоты, в том числе радиоимпульсов.

Характеристикой, оценивающей качество низкочастотного конденсатора, служит удельная емкость $c_{уд}$ [см. формулы (1-192) и (1-193)], а мощного высокочастотного конденсатора — удельная реактивная мощность $p_{уд}$.

Согласно выражению (1-205) удельную реактивную мощность можно представить так:

$$p_{уд} = \frac{\alpha_T \Delta t}{\operatorname{tg} \delta} \cdot \frac{S_{охл}}{V},$$

где отношение $\frac{S_{охл}}{V}$ зависит от конфигурации конденсатора.

Если для изготовления низкочастотных конденсаторов используются как низкочастотные, так и высокочастотные

керамические материалы (табл. 12 и 13), то для изготовления мощных высокочастотных конденсаторов можно применять только высокочастотную керамику с малыми диэлектрическими потерями (табл. 12). В зависимости от емкости, величины рабочего напряжения и реактивной мощности керамические конденсаторы высокого напряжения выполняются в виде трубок, горшков, колец, дисков, боченков и стержней. Трубчатые и горшковые конденсаторы могут быть значительных габаритов (до 150 *мм* в диаметре и до 300 *мм* длиной), а следовательно, могут сочетать высокие значения емкости, рабочего напряжения и реактивной мощности. Отношение активной поверхности к объему трубчатых и горшковых конденсаторов невелико: каналы этих конденсаторов закрыты арматурой, а бортики, заметно увеличивающие их длину и диаметр, очень мало сказываются на теплоотдаче.

В боченочном конденсаторе размеры по высоте, диаметру и толщине стенки соизмеримы. Эти конденсаторы изготовляются только небольшого размера и, следовательно, ограниченной емкости, так как по условиям технологии трудно изготовлять крупногабаритные толстостенные изделия (с толщиной стенки, превосходящей 25—30 *мм*). Удельная реактивная мощность боченочных конденсаторов всегда выше, чем трубчатых или горшковых при прочих равных условиях, так как вся их поверхность, так же, как и стержневых, участвует в теплоотводе.

Стержневые конденсаторы при заданном значении диэлектрической проницаемости отличаются минимальной емкостью и высокими значениями напряжения поверхностного разряда.

Тепловой баланс конденсатора не изменится, если любое изменение толщины стенки компенсируется таким же изменением диэлектрической проницаемости. В этой связи при заданных напряжении, частоте, $tg\delta$, диаметре, высоте, температуре поверхности конденсатора и условиях охлаждения можно выбрать материал, диэлектрическая проницаемость которого предопределяет приемлемую с точки зрения керамической технологии толщину стенки. Применяя керамику с различными значениями диэлектрической проницаемости, можно уменьшить число видоразмеров, необходимых для получения заданных значений номинальной емкости при надлежащей геометрии конденсатора. Имеется в виду то обстоятельство, что уменьшение или увеличение линей-

ных размеров конденсатора данной конфигурации возможно лишь в определенных границах; затем одна конфигурация трансформируется в другую, например диск превращается в боченок, а при дальнейшем увеличении толщины стенки — в стержень, боченок с увеличением глубины одной из выточек превращается в горшок и т. д.

При высоких частотах коронные и разрядные напряжения близки или даже совпадают. В этой связи электрическое поле в межэлектродном промежутке высокочастотного конденсатора высокого напряжения должно быть достаточно однородно. Практически это достигается за счет кольцевой выточки в утолщенной части диэлектрика у края электрода. Выточка металлизируется, края электродов становятся полусферическими. В результате силовые линии рассредоточиваются и краевая емкость уменьшается. В зависимости от радиуса закругления выточки и длины разрядного промежутка градиент разрядного напряжения керамических конденсаторов находится в пределах 0,3 ÷ 0,9 *кв/мм* (эффективное значение).

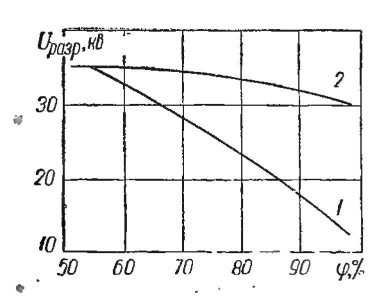


Рис. 68. Кривые зависимости разрядного напряжения для боченочного конденсатора типа КВКБ-12 от относительной влажности воздуха:

1 — незащищенный конденсатор; 2 — покрытый эмаль-лаком. Постоянное напряжение.

При высокой частоте напряжение поверхностного разряда не зависит от влажности воздуха, но заметно снижается с ее увеличением при технической частоте и постоянном напряжении. С целью ослабить влияние влажности корпус конденсатора (вместе с бортиками) защищают эмаль-лаком, что значительно повышает разрядное напряжение при низких частотах (рис. 68). Краевую емкость керамического конденсатора высокого напряжения учитывают аналогично конденсаторам низкого напряжения, у которых электрод не совпадает с торцом цилиндра.

Действующие значения диаметра электродов плоского (дискового) и длины электродов цилиндрического конденсаторов определяются по формулам:

$$D_д = D + k(d + 2r);$$

$$L_д = L + k(d + 2r),$$

где D и L — соответственно диаметр электродов плоского конденсатора и длина электродов цилиндрического конденсатора между бортиками;

d — толщина стенки конденсатора;

r — радиус закругления электродов;

k — коэффициент, который принимается равным 0,5.

Можно рассматривать два коэффициента, характеризующих конструкцию керамического конденсатора высокого напряжения:

$$k_э = \frac{S_V}{S_э}; \quad k_t = \frac{S_V}{S_t},$$

причем $k_э > k_t$.

Здесь S_V — поверхность конденсатора, определяющая его эффективный объем (с учетом бортиков и каналов);

S_t — активная поверхность, определяющая теплоотдачу;

$S_э$ — поверхность электрода, определяющая электрическую емкость.

Удельная реактивная мощность, отнесенная к единице объема активного диэлектрика конденсатора,

$$p'_{уд} = \frac{U^2 f \varepsilon}{1{,}8 \cdot 10^{12}},$$

а реактивная мощность, отнесенная к полному объему конденсатора,

$$p_{уд} = \frac{P_р}{S_V d} = \frac{U^2 f \varepsilon S_э}{1{,}8 \cdot 10^{-12} S_V d^2} = \frac{p'_{уд}}{k_э d^2}. \tag{2-6}$$

Из выражения для теплового баланса конденсатора $p_{уд} \frac{S_э}{d} \operatorname{tg} \delta = \alpha_т S_t (t_2 - t_1)$ находим толщину стенки

$$d = \frac{k_t p'_{уд} \operatorname{tg} \delta}{k_э \alpha_т (t_2 - t_1)}, \tag{2-7}$$

где t_2 — температура поверхности конденсатора, а t_1 — температура окружающей среды.

Подставляя значение d по (2-7) в выражение (2-6), получаем видоизмененную формулу для удельной реактивной мощности плоского конденсатора *

$$p_{уд} = \frac{k_э \alpha_т^2 (t_2 - t_1)^2}{k_t p'_{уд} \operatorname{tg}^2 \delta}. \tag{2-8}$$

Из формулы видно, что удельная реактивная мощность тем больше, чем меньше емкость (больше коэффициент $k_э$) и меньше рабочее напряжение (меньше размеры бортиков, меньше коэффициент k_t). Как правило, реактивная мощность керамического конденсатора рассчитывается при температуре поверхности 100° С. Применяя новые нагревостойкие керамические материалы (например, цельзиановую керамику), можно повысить температуру поверхности конденсатора до 150° С.

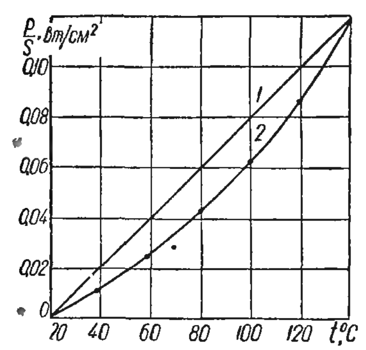


Рис. 69. Кривые зависимости мощности, рассеиваемой с единицы поверхности керамического конденсатора, от температуры:
1 — рассеивание вследствие конвекции при $\alpha_к = 0{,}001$ *вт/см²·град*; *2* — рассеивание вследствие излучения (лучеиспускания) при $k_и = 0{,}95$.

В тепловом балансе деталей, нагретых до температуры 100—150° С, коэффициент теплоотдачи $\alpha_т$ определяется как конвективной, так и радиационной теплоотдачей. Величина $\alpha_т$ зависит от конфигурации конденсатора, расположения его в пространстве, разности температур между поверхностью и окружающей средой, состояния поверхности.

При упрощенных тепловых расчетах принимается, что теплоотдача линейно возрастает с ростом разности температур, т. е. зависимость $\alpha_т$ от температуры не учитывается.

Радиационная теплоотдача нагретого тела определяется коэффициентом излучения материала $k_и$. Для металлических тел величина $k_и$ обычно не превышает 0,06, а для неметаллических, в частности неорганических и органических диэлектриков, $k_и$ находится в пределах 0,92—0,96, увеличи-

* Для цилиндрического конденсатора формула удельной реактивной мощности иная. Учащемуся предоставляется самостоятельно вывести формулу для удельной реактивной мощности цилиндрического конденсатора.

ваясь с повышением температуры. На рис. 69 приведена кривая зависимости количества тепла, рассеиваемого вследствие лучеиспускания с единицы площади, от температуры конденсатора. Для сравнения на том же рисунке нанесена прямая, тангенсом угла наклона которой служит коэффициент теплоотдачи, обусловленный конвекцией, величина которого для среднегабаритных изделий принята равной 0,001 *вт/см²·град*.

Экспериментально установлено, что реактивная мощность высокочастотных керамических конденсаторов с электродами, покрытыми цветной эмалью, на 40—45% больше, чем тех же конденсаторов с полированными электродами. Эмалевое покрытие не только защищает серебро от коррозии и повышает разрядное напряжение при высокой влажности, но и улучшает условия охлаждения конденсатора.

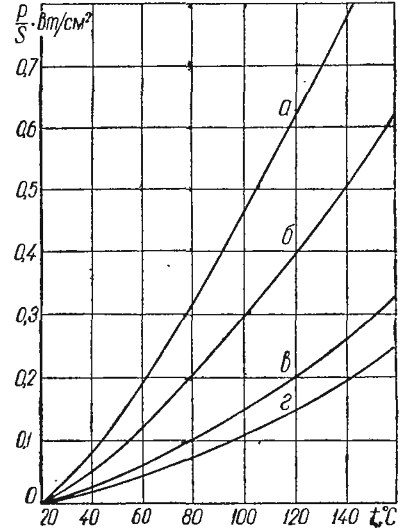


Рис. 70. Кривые зависимости мощности, рассеиваемой с единицы поверхности керамических конденсаторов вследствие конвекции и излучения, от температуры для бочечных (*а* — КВБ-2, 10 *квар*; *б* — КВБ-4, 5 *квар*) и горшковых (*в* — КВКГ-3, 10 *квар*; *г* — КВКГ-14, 15 *квар*) конденсаторов.

Коэффициент конвективной теплоотдачи вертикально и горизонтально расположенных гладких цилиндров определяется формулой

$$\alpha_{к} = k\left(\frac{\Delta t}{D}\right)^{0,25}\psi(l), \qquad (2\text{-}9)$$

где k — коэффициент, связанный с расположением цилиндра;

Δt — перепад температур между поверхностью тела и окружающей средой;

D — диаметр цилиндра, *мм*;

$\psi(l)$ — коэффициент, связанный с длиной цилиндра.

Если длина вертикально расположенного цилиндра больше 300 *мм*, то коэффициент $\psi(l)$ равен единице. Рис. 70 иллюстрирует эффект суммарной (конвекция, излучение)

теплоотдачи керамических конденсаторов. При искусственном воздушном охлаждении коэффициент теплоотдачи увеличивается в 3—4 раза, а при водяном — в 25—30 раз. При таком форсированном охлаждении реактивная мощность конденсатора ограничивается электрической прочностью керамики, которая относительно невелика, особенно при высоких частотах. Вследствие недостаточной надежности керамических конденсаторов при повышенных градиентах электрического поля, а также ввиду сложности практического выполнения, искусственное охлаждение конденсаторов применяется редко.

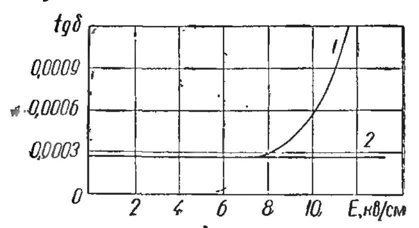


Рис. 71. Кривые зависимости tgδ от напряженности поля при частоте 1 *Мгц* для двух керамических конденсаторов:

1 — с заметной закрытой пористостью; 2 — с плотной структурой.

В общем случае выделение тепла в высокочастотных конденсаторах высокого напряжения определяется потерями в материале диэлектрика, потерями на ионизацию газа в закрытых порах и джоулевыми потерями в обкладках и в выводах. Характерной особенностью ионизационных потерь является зависимость tgδ от напряженности электрического поля. Из рис. 71 следует, что слева от порогового напряжения наблюдаются только потери в материале диэлектрика, а справа на них накладываются ионизационные.

Потери в обкладках и в арматуре конденсатора зависят от величины тока, частоты, удельного сопротивления материала обкладок и арматуры и от конструкции арматуры. Глубина проникновения тока в металл определяется выражением (1-100). Для серебра при частоте 24 *Мгц* $\Delta = 13$ *мк*.

Если за эффективную площадь сечения проводника принять произведение $\Delta\Psi$, где Ψ — периметр проводника, то практически можно считать, что плотность тока в проводнике

$$j = \frac{I}{\Psi\Delta}, \qquad (2\text{-}10)$$

где I — полный ток. С ростом частоты глубина проникновения тока в металл уменьшается и, как следствие этого, увеличиваются потери в арматуре и в электродах конденсатора.

Зависимость допускаемой реактивной мощности от частоты приведена на рис. 72. В области частот от нуля до $f_н$ * реактивная мощность меньше номинальной вследствие ограничения по рабочему напряжению и пропорциональна частоте:

$$P_р = U_н^2 2\pi f C. \tag{2-11}$$

В области частот от $f_н$ до $f_в$ реактивная мощность ограничивается допустимым перегревом поверхности конденсатора.

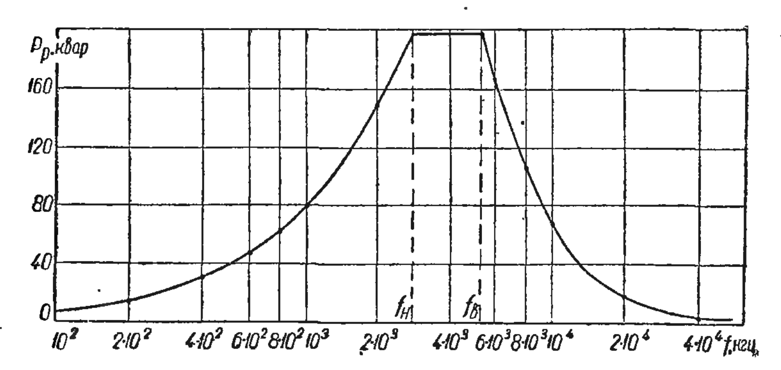


Рис. 72. Кривые зависимости допускаемого значения реактивной мощности от частоты для керамического конденсатора высокого напряжения.

Постоянство реактивной мощности в этой области может быть достигнуто снижением рабочего напряжения.

При некоторой частоте $f_в$ становятся существенными джоулевы потери в арматуре. Поэтому реактивная мощность в области частот $f > f_в$ определяется предельно допускаемым током, т. е. током, который нагревает электроды или арматуру конденсатора до температуры, превышающей температуру окружающей среды на 50° С:

$$P_р = \frac{I_{доп}^2}{2\pi f C}, \tag{2-12}$$

причем

$$I_{доп} = j_{доп} \Psi \Delta = \frac{k\Psi}{\sqrt{f}}, \tag{2-13}$$

* $f_и$ — нижняя критическая частота; ее называют также номинальной частотой, поскольку она отвечает номинальным значениям реактивной мощности и рабочего напряжения.

где k — постоянный коэффициент, зависящий от материала, размеров арматуры и предельно допускаемой температуры выводов.

С помощью формулы (2-13) можно рассчитать размеры арматуры (ширину ленты, диаметр стержня), обеспечивающие надежную работу конденсатора в заданном режиме. Исходными данными служат значения тока, частоты и температуры вывода, полученные экспериментально при заданных условиях охлаждения.

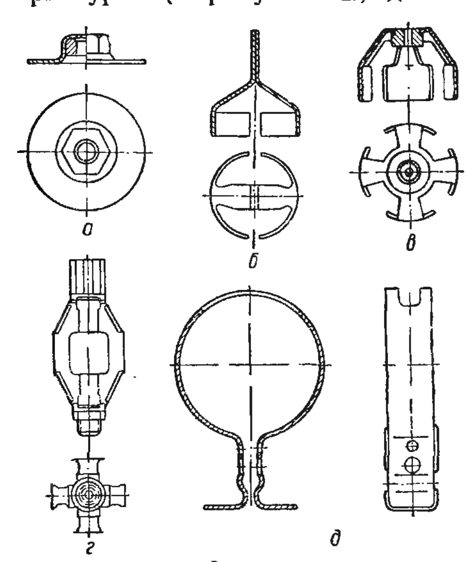


Рис. 73. Конструкция выводов керамических конденсаторов высокого напряжения:
а — вывод для плоских конденсаторов; *б*, *в*, *г*, — для трубчатого и горшкового типов конденсаторов; *д* — вывод от наружной обкладки в тех же типах конденсаторов.

Конструкция арматуры выбирается в зависимости от габаритных размеров, веса конденсатора и условия монтажа в аппаратуре. Плоские конденсаторы армируются штуцерным выводом (рис. 73, *а*) или гибкой лентой. Наружным выводом трубчатых и горшковых конденсаторов служит обычно хомут, стягиваемый вокруг корпуса конденсатора болтами (рис. 73, *д*). Внутренней арматурой трубчатых и горшковых конденсаторов малой реактивной мощности может быть жесткая лента, припаиваемая к электродам. Трубчатые конденсаторы большой реактивной мощности имеют несколько вариантов внутренней арматуры (рис. 73, *б*, *в*, *г*). Внутренний вывод конструкции *б* припаивается к электроду конденсатора. Арматура варианта *г* крепится внутри конденсатора перемещением гайки по центральному стержню. Различные варианты крепления приведены на рис. 74, *а*, *б*, *в* и *г*.

Джоулевы потери в обкладках конденсатора могут быть определены по методу расчета потерь в длинной линии.

Соответствующие формулы для определения потерь в цилиндрической и полусферической частях горшкового конденсатора при различном положении токоснимателя приведены ниже.

Вариант *а* (рис. 73, *а*):

$$P_{об} = 1{,}94 \cdot 10^{-24} U^2 f^2 \varepsilon^2 \frac{\rho l^3}{r\Delta 3 \left(\ln \frac{R_к}{r_к}\right)^2}. \qquad (2\text{-}14)$$

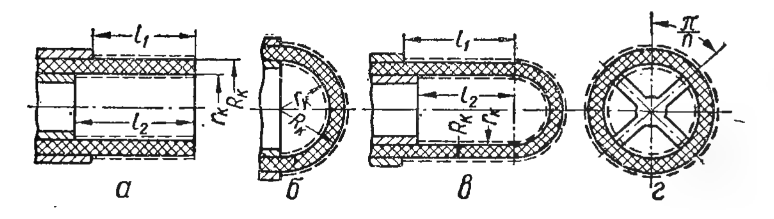


Рис. 74. Различные варианты крепления арматуры горшкового конденсатора.

Вариант *б* (рис. 73, *б*):

$$P_{об} = 0{,}52 \cdot 10^{-24} U^2 f^2 \varepsilon^2 \frac{\rho}{\Delta} \left(\frac{R_к r_к}{R_к - r_к}\right)^2. \qquad (2\text{-}15)$$

Вариант *в* (рис. 73, *в*):

$$P_{об} = 1{,}94 \cdot 10^{-24} U^2 f^2 \varepsilon^2 \frac{\rho l}{r\Delta} \left[\frac{l^2}{3\left(\ln \frac{R_к}{r_к}\right)^2} + \frac{l R_к r_к}{2(R_к - r_к)\ln \frac{R_к}{r_к}} + \left(1 + 0{,}268 \frac{r}{l}\right)\left(\frac{R_к r_к}{R_к - r_к}\right)^2\right]. \qquad (2\text{-}16)$$

Вариант *г* (рис. 73, *г*):

$$P_{об} = \frac{9{,}6 \cdot 10^{-24}}{n^2} U^2 \varepsilon^2 f^2 \frac{\rho L r}{\Delta \left(\ln \frac{R_к}{r_к}\right)^2}. \qquad (2\text{-}17)$$

В этих формулах для наружной обкладки следует принимать $r = R_к$ и $l = l_1$, а для внутренней $r = r_к$ и $l = l_2$;

Δ — толщина обкладок;

L — длина аксиальных контактов (все размеры в *см*);

ρ — удельное сопротивление материала обкладок, *ом · см*.

Из приведенных выражений видно, что потери в обкладках возрастают пропорционально квадрату частоты. Существенное значение они приобретают при метровых волнах и сверхвысоких частотах.

Вне зависимости от частоты электрического тока номинальная реактивная мощность керамических конденсаторов при определенной температуре окружающей среды, обычно 100° С, должна быть снижена, как это показано на рис. 75. Такое снижение реактивной мощности вызвано не только увеличением потерь в керамике с ростом температуры, но и уменьшением механической прочности припоя.

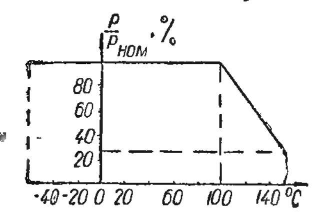


Рис. 75. Кривая зависимости допускаемой реактивной мощности керамических конденсаторов от температуры окружающей среды.

Пример. Для расчета керамического конденсатора высокого напряжения следует рассчитать допустимую реактивную мощность, рабочее напряжение, значения критических частот для горшкового конденсатора КВКГ-3 (толщина стенки 6 *мм*) по спецификации ГОСТ 7160—63, определить джоулевы потери в обкладках этого конденсатора при номинальных значениях рабочего напряжения и реактивной мощности, а также в диапазоне СВЧ до $f = 100$ *Мгц*.

По ГОСТ 7160—63 определяем электрические характеристики материала конденсатора КВКГ-3 и его размеры.

Диэлектрическая проницаемость керамики с ТКЕ-700 · 10^{-6} равна 75. Реактивную мощность определяем по формуле

$$P_р = \frac{\alpha_т S_{охл}(t_2 - t_1)}{tg\,\delta}. \qquad (2\text{-}18)$$

Предельная температура поверхности конденсатора согласно рис. 75 составляет 100° С. Принимаем окружающую температуру равной 40° С. Значение $tg\delta$ при 100° С принимаем равным $10 \cdot 10^{-4}$, а значение $\alpha_т$ при этой температуре, согласно рис. 70, 0,0018 *вт/см*^{2} · *град*.

Пользуясь спецификацией ГОСТ 7160—63, определим активную поверхность конденсатора $S_{охл}$, которая представляет сумму поверхностей полусферы S_1 и цилиндра S_2 (рис. 76).

Поверхность полусферы

$$S_1 = \frac{1}{2} \cdot 4\pi R^2 = 6{,}28R^2 = 32\ см^2;$$

поверхность цилиндра

$$S_2 = \pi R(2h + R),$$

где $h = H - R + \frac{1}{2}c$; (c — высота бортика),

$$S_2 = 3{,}14 \cdot 2{,}25 \cdot 17{,}25 = 122\ см^2.$$

Поверхность конденсатора $S_{охл} = S_1 + S_2 = 32 + 122 = 154$ *см²*. Реактивная мощность конденсатора

$$P_р = \frac{0{,}0018 \cdot 154 \cdot (100 - 40)}{10 \cdot 10^{-4}} = 16{,}6 \text{ квар.}$$

Таким образом, коэффициент запаса по реактивной мощности относительно ее значения, установленного ГОСТ, составляет

$$k = \frac{16{,}6}{10} = 1{,}66.$$

Удельную реактивную мощность конденсатора КВКГ, отнесенную к полному объему конденсатора с учетом объема внутреннего воздушного канала, рассчитываем по формуле (1-199), где V — полный объем горшкового конденсатора, составленный из объема полусферы и объема цилиндра.

Объем полусферы

$$V_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{1}{2} \cdot 4{,}18 \cdot 2{,}25^3 = 24 \text{ см}^3;$$

объем цилиндра $V_2 = \pi R^2 h = 3{,}14 \cdot 2{,}25^2 \cdot 8{,}75 = 139$ *см³*;

объем конденсатора $V = V_1 + V_2 = 24 + 139 = 163$ *см³*.

Удельная реактивная мощность

$$p_{уд} = \frac{16{,}6}{163} = 0{,}12 \text{ квар/см}^3.$$

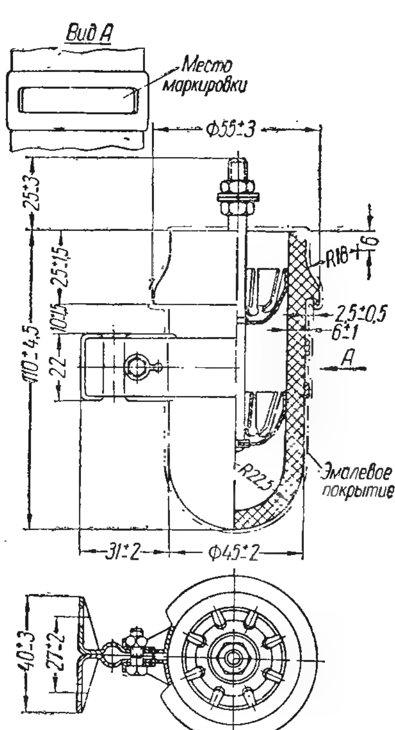


Рис. 76. Керамический конденсатор горшкового типа КВКГ-3: емкость 1000 *пф*, номинальная реактивная мощность 10 *квар*, номинальное напряжение 7 *кв*.

При определении удельной реактивной мощности, отнесенной к единице объема диэлектрика $p'_{уд}$, объем воздушного канала учитывать не надо, т. е. следует вычислять объем диэлектрика как сумму объемов сегмента и цилиндрической трубы.

Объем шарового сегмента $V'_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{4\pi}{3} (R^3 - r^3) = 2{,}09 (2{,}53^3 - 1{,}65^3) = 14{,}4$ *см³*;

объем цилиндрической трубы $V_2 = \pi h (R^2 - r^2) = 3{,}14 \cdot 7{,}5 (2{,}25^2 - 1{,}65^2) = 55{,}2$ *см³*;

объем диэлектрика $V' = 14{,}4 + 55{,}2 = 69{,}6$ *см³*.

Удельная мощность, рассчитанная на единицу объема диэлектрика,

$$p'_{уд} = \frac{16,6}{69,6} = 0,24\ квар/см^3.$$

Допускаемая напряженность поля при частоте 10^5 *гц* и $p_{уд} = 0,12\ квар/см^3 = 120\ вар/см^3$

$$E_д = \sqrt{\frac{p'_{уд} \cdot 1,8 \cdot 10^{-12}}{\varepsilon f}} = \sqrt{\frac{120 \cdot 1,8 \cdot 10^{-12}}{75 \cdot 100 \cdot 10^3}} = 5,7\ кв/см.$$

Допускаемая напряженность поля при том же значении частоты и при увеличении $p_{уд}$ до 0,24 *квар/см*^{3}

$$E_д = \sqrt{\frac{240 \cdot 1,8 \cdot 10^{-12}}{7,5 \cdot 100 \cdot 10^3}} = 7,6\ кв/см.$$

Допускаемое эффективное значение рабочего напряжения при толщине стенки конденсатора d $U = E_д d$. При найденных значениях $E_д$ и толщине стенки 0,6 *см* получаем

$$V_1 = 5,7 \cdot 0,6 = 3,4\ кв; \qquad V_2 = 7,6 \cdot 0,6 = 4,5\ кв.$$

В ГОСТ на высоковольтные конденсаторы рабочее напряжение принято равным 4 *кв эфф.*

Потери в обкладках конденсатора КВКГ-3 при расположении токоснимателей по варианту *б* (рис. 74) определяем по формуле (2-15).

Для конденсатора КВКГ-3: $C = 1000$ *пф*; $P_р = 10$ *квар*; $R_к = 2,25$ *см*; $r_к = 1,6$ *см*; $U_{эфф} = 4$ *кв*; $\Delta = 0,0015$ *см* (при двух-, трехкратном серебрении); для серебра $\rho = 162 \cdot 10^{-8}$ *ом · см*.

Частота тока, которой отвечают указанные значения реактивной мощности и рабочего напряжения,

$$f = \frac{P_р}{2\pi U^2 C} = \frac{1000}{6,28 \cdot 4000 \cdot 4000 \cdot 1000 \cdot 10^{-12}} = 100\ кгц.$$

Потери в обкладках конденсатора при частоте 100 *кгц*

$$P_{об} = 0,52 \cdot 10^{-24} \cdot 4000 \cdot 4000 \cdot 75 \cdot 75 \cdot 10^{10} \times$$
$$\times \frac{162 \cdot 10^{-8}}{15 \cdot 10^{-4}} \cdot \frac{(2,25 \cdot 1,6)^2}{0,55} = 1,5 \cdot 10^{-5}\ вт.$$

При частоте 100 *Мгц* потери в обкладках возрастут:

$$P_{об} = 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{10^{16}}{10^{10}} = 15\ вт.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Аладьев А. Т., Надежность керамических конденсаторов большой мощности, «Электричество», 1962, № 2.

2. Богородицкий Н. П., Фридберг И. Д., Конструирование и расчет мощных керамических конденсаторов, «Электричество», 1946, № 11.

3. Богородицкий Н. П. и др., Графоаналитический метод расчета напряжения теплового пробоя высокочастотных изоляторов, «Электричество», 1961, № 12.

4. Жилинский М. А., К расчету слюдяных конденсаторов, «Вестник электропромышленности», 1930, № 1 и 2.

5. Казарновский Д. М., Сегнетокерамические конденсаторы, Госэнергоиздат, 1956.

6. Карпихин В. В., Технология изготовления слюдяных и стекло-эмалевых конденсаторов, «Энергия», 1963.

ГЛАВА 3

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ БУМАЖНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

§ 11. ОСНОВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ БУМАЖНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

В бумажных конденсаторах для активного диэлектрика применяется конденсаторная бумага, отличающаяся от обычных бумаг малой толщиной, повышенной плотностью и механической прочностью. Малое содержание примесей (бумага почти на 100% состоит из клетчатки) и повышенная плотность увеличивают электрическую прочность конденсаторной бумаги в сравнении с другими сортами электротехнических бумаг.

По ГОСТ 1908 — 57 предусматривается изготовление двух сортов конденсаторной бумаги КОН-1 с объемным весом 1,0 *г/см*^{3} и толщиной 7, 8, 10, 12, 15, 22, 30 *мк* и КОН-2 с объемным весом 1,16—1,25 *г/см*^{3}, толщиной 5, 6, 7, 8, 10, 12, 15, 22 и 30 *мк*. Значение объемного веса соответствует бумаге с влажностью 8 ± 1%.

Небольшими партиями изготовляется также бумага КОН-2 толщиной 4 *мк*, не предусмотренная ГОСТ. В настоящее время осваивается выпуск бумаги со сниженным ($\gamma = 0{,}8$ *г/см*^{3}) и повышенным ($\gamma = 1{,}3 - 1{,}35$ *г/см*^{3}) объемным весом.

При изменении объемного веса бумаги меняются ее электрические характеристики. Чем плотнее бумага, т. е. чем большая доля ее объема заполнена клетчаткой, тем выше диэлектрическая проницаемость и электрическая прочность. С ростом плотности возрастает и значение тангенса угла диэлектрических потерь сухой бумаги.

Для конденсаторов, работающих при постоянном токе, когда диэлектрические потери не имеют существенного значения, целесообразно применять бумагу с повышенной плотностью, так как она имеет повышенное значение диэлектрической проницаемости. В конденсаторах, работающих при переменном токе, для снижения потерь применяют бумагу пониженной плотности.

За рубежом начат выпуск специальной оксидной бумаги, содержащей до 5% окиси алюминия. Такая бумага при пропитке легко загрязняющимися хлорированными массами, ухудшающими угол потерь после заливки в корпус конденсатора, обеспечивает «доочистку» пропиточной массы в готовом конденсаторе, так как содержащаяся в бумаге окись алюминия служит адсорбентом, поглощающим ионы загрязнений, содержащиеся в пропиточной массе. Успешные опыты по изготовлению оксидной бумаги начаты и в СССР.

Таблица 15

Зависимость относительной стоимости конденсаторной бумаги от ее толщины

Относительная цена		Толщина, *мк*
КОН-1	КОН-2	
—	2,5	6
2,39	2,27	7
1,73	1,59	8
1,0	0,91	10
0,86	0,775	12
0,67	0,645	15—30

При выборе толщины бумаги надо учитывать, что ее стоимость за единицу веса возрастает при снижении толщины. Это обусловлено как увеличением расхода электроэнергии на более длительный размол бумажной массы для отлива тонких бумаг, так и уменьшением процента выхода годных партий бумаги малой толщины. В табл. 15 приведена относительная цена конденсаторной бумаги КОН-1 и КОН-2 по данным 1961 г. Сравнение дается относительно стоимости бумаги КОН-1 толщиной 10 *мк*.

Конденсаторная бумага является неоднородным диэлектриком, состоящим из клетчатки, занимающей в зависимости от плотности бумаги 51—87% ее объема. Остальная часть объема приходится на долю пор, содержащих воздух и частично заполненных влагой. В воздушно-сухом состоянии количество влаги доходит до 10% от веса бумаги.

Для повышения электрической прочности и диэлектрической проницаемости бумагу высушивают и пропитывают различными жидкими или отвердевающими полярными или неполярными составами. При выборе типа пропиточной массы надо исходить из следующих соображений.

1. Преимуществом отвердевающих масс является возможность применения дешевой негерметизированной конструкции, но лишь при том условии, что от конденсатора не требуется высокая влагостойкость. При пропитке твердой массой легче получить высокое значение постоянной времени при повышенной температуре, но электрическая прочность и диэлектрическая проницаемость снижаются за счет усадки массы при отвердевании. Полимеризующиеся смолы и компаунды дают меньшую усадку (2—8%) в сравнении с воскообразными материалами (10—15%), а кроме того, температура плавления (ограничивающая верхний предел рабочей температуры конденсатора) у воскообразных материалов обычно ниже, чем максимальная температура, допускаемая для синтетической смолы после ее полимеризации. Поэтому полимеризующимся смолам теперь отдают предпочтение при выборе пропитывающего состава.

Отвердевающие массы применяют в основном только для пропитки небольших бумажных конденсаторов, рассчитанных на работу при постоянном напряжении не выше 600—1000 *в*. Основным типом пропиточных масс, используемых в производстве бумажных конденсаторов, служат теперь жидкие массы.

2. Преимуществом полярных масс, твердых и жидких, является повышенная $\varepsilon_п$, обеспечивающая существенный выигрыш в емкости конденсатора. Однако такие массы имеют повышенный $tg\delta_п$ и сниженное удельное сопротивление, что не всегда допустимо. При постоянном напряжении полярные хлорированные массы необходимо стабилизировать, так как они склонны к выделению активных продуктов (хлор, соляная кислота), снижающих срок службы конденсаторов. При переменном напряжении хлорированные массы более устойчивы к длительному действию поля, чем неполярные углеводородные массы. Повышение угла потерь бумаги при пропитке такой хлорированной массой можно скомпенсировать применением нового типа бумаги с пониженной плотностью и сниженными потерями.

3. При повышенных напряжениях постоянного тока (выше 600—1000 *в*) и при напряжении переменного тока выше 250 *в* рекомендуется использовать только жидкие пропиточные массы, чтобы обеспечить отсутствие остаточных воздушных включений и резкое повышение напряжения начала ионизации в конденсаторном диэлектрике.

Характеристики нескольких основных пропитывающих составов приведены в табл. 16.

Обкладки конденсаторов нагреваются проходящим по ним током и одновременно отводят тепло от диэлектрика к корпусу конденсатора. В процессе работы конденсатора на обкладки из фольги действуют механические напряжения, вызванные электродинамическими силами, возникающими при протекании токов в близко расположенных электродах. Материал обкладок испытывает также механические нагрузки при намотке и сборке конденсаторных секций. Этими условиями определяются требования к материалу обкладок: он должен обладать высокой электропроводностью, теплопроводностью и механической прочностью. Чаще всего для обкладок применяется алюминиевая фольга.

Для изготовления фольги применяется алюминий марок АО (99,6% Al), А-1 (99,5% Al), АД-1 (99,3% Al) и АД (98,8% Al). Удельное сопротивление алюминия, как и других проводниковых материалов, растет при увеличении процента содержащихся в нем примесей. У наиболее чистого, отожженного алюминия $\rho = 0{,}026\ \frac{ом \cdot мм^2}{м}$, у алюминия марки А-1 $\rho = 0{,}0282\frac{ом \cdot мм^2}{м}$. Температурный коэффициент сопротивления ТКρ = 0,004 *град*$^{-1}$ в интервале температур 0—150° С.

В соответствии с ГОСТ 618—62 «Фольга алюминиевая, рулонная для электротехнических целей», фольга выпускается толщиной от 0,005 до 0,2 *мм* при ширине рулона от 10 до 460 *мм*. Допуски по толщине колеблются в пределах от ±10 до ±20%, что при конструировании может вызывать заметное отклонение фактической толщины и веса секции от расчетных величин, полученных при номинальных размерах.

Фольга выпускается двух сортов — твердая и мягкая (отожженная),— различающихся по своим механическим характеристикам. Для мягкой фольги временное сопротивление разрыву составляет не менее 3,0 *кГ/мм*², для твердой — не менее 10 *кГ/мм*². Для мягкой фольги относительное удлинение при разрыве нормируется: для толщин 0,012—0,04 *мм* должно быть не менее 2% и для толщин 0,05—0,2 *мм* — не менее 3%. При росте температуры от 20 до 200° предел на растяжение у алюминия снижается примерно в два раза.

Таблица 16

Характеристики пропитывающих составов для бумажных конденсаторов

Характеристика	Конденсаторное масло	Совол	Конденсаторный вазелин	Касторовое масло
Плотность, *г/см*^{3}, при $t = 20°$ С	0,86—0,89	1,51—1,56	0,83—0,88	0,95—0,97
Температура застывания, °С	—45°	+5 — +6	+30 — +40	—15 ÷ —17
Теплопроводность, *вт/см·град*	0,0013	0,00101	—	—
Теплоемкость при 20—100° С, *ккал/кг·град* . . .	0,43—0,58	0,36	—	—
Температурный коэффициент объемного расширения, $\frac{1}{°C}$	0,0006—0,0007	0,001	—	—
Удельное объемное сопротивление при 20° С, *ом·см*	10^{14}	10^{13}—10^{14}	$>10^{14}$	10^{12}
Электрическая прочность при 50 *гц*, 20° С, *кв/см*	200	170	>200	200
Диэлектрическая проницаемость при 50 *гц*, 20° С	2,1—2,3	4,6—5,2	2,1—2,2	4,2—4,7
Тангенс угла диэлектрических потерь при 50 *гц*, 90° С	0,005	0,03—0,003	<0,002	>0,01

За сравнительно короткий промежуток времени под влиянием нагрева при температуре порядка 150° С начинается процесс рекристаллизации алюминия и переход твердого алюминия в отожженный. Полный отжиг алюминиевой проволоки при $t = 260°$ С происходит через 60 *сек*, а при $t = 500°$ С — через 1 *сек*.

Алюминий обладает свойством ползучести — медленной деформации под влиянием постоянно приложенной силы. Процесс ползучести начинается при $\sigma = 0{,}67\ \sigma_{раст}$.

Следует также учитывать явление вибрационной усталости алюминия — при работе слабо сжатого конденсатора возможна вибрация обкладок и выводов, в результате чего они постепенно разрушаются.

К тепловым характеристикам алюминия относятся: температура плавления 656° С, коэффициент теплопроводности 2 *вт/см · град*, удельная теплоемкость при 20° С — 0,225 *кал/ч · град*, температурный коэффициент линейного расширения, равный $24 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$ в интервале 20—100° С.

Чистая поверхность алюминиевой фольги при воздействии на нее кислорода воздуха покрывается оксидной пленкой (Al_2O_3) толщиной 0,01—0,1 *мк* и плотностью 2,8—3,2 *г/см*^{3}. Электрические характеристики оксидной пленки имеют следующие значения: $\varepsilon \approx 10$, $\rho_V = 10^{13}$ *ом · см*, $\operatorname{tg}\delta = 0{,}02$, $E_{пр} = 390$ *в/мк*. Эти данные следует рассматривать как ориентировочные, так как на все характеристики пленки сильно влияют ее пористость и количество влаги, содержащейся в порах. Пленка защищает поверхность алюминия от дальнейшего окисления и от взаимодействия с пропитывающими составами. Оксидная пленка на обкладке конденсатора включена последовательно с основным диэлектриком.

Малая толщина оксидной пленки по сравнению с толщиной основного слоя диэлектрика бумажных конденсаторов, а также большое количество дефектных мест в оксидной пленке, образующейся в естественных условиях, позволяют не считаться с влиянием оксидного слоя на такие характеристики конденсатора, как емкость, сопротивление изоляции, диэлектрические потери.

Некоторое влияние оксидная пленка оказывает на ухудшение контакта между обкладками конденсатора и вкладными выводами.

При проектировании конденсатора должны быть выбраны: марка алюминия, из которого изготовлена фольга;

сорт фольги — твердая или мягкая; ширина рулона; толщина фольги.

Фольга из более чистого алюминия марки АО имеет более высокую электропроводность и теплопроводность, чем фольга из алюминия марок А1 и АД, и соответственно более высокую стоимость.

Твердая фольга по механической прочности превосходит мягкую более чем в три раза. В конденсаторной промышленности из технологических соображений для получения больших скоростей намотки секций и уменьшения числа обрывов при намотке применяют твердую фольгу, хотя она имеет несколько меньшую электропроводность, чем мягкая.

Ширина рулона фольги должна быть выбрана в соответствии с ГОСТ 618—62. Размеры конденсаторной секции выбираются с учетом этой стандартной ширины. Толщина фольги прежде всего определяется по тем усилиям, которым фольга подвергается при намотке секций. В результате теплового расчета конденсатора толщину фольги иногда приходится увеличивать по сравнению с толщиной, выбранной по условиям механических нагрузок.

Для выводов (вкладышей) секции конденсаторов выбирается либо более толстая, чем для электродов, алюминиевая фольга, либо медная луженая фольга толщиной 0,05 *мм*. Для перемычек между секциями и для выводов конденсатора применяется медная фольга толщиной 0,3—0,5 *мм*.

Диэлектрическая проницаемость пропитанной бумаги

При расчете диэлектрической проницаемости пропитанной бумаги необходимо учесть ее структуру: бумага состоит из твердой фазы — клетчатки и пор, которые заполняются пропитывающим составом. Большая часть волокон клетчатки расположена параллельно поверхности бумаги, поэтому такой диэлектрик можно рассматривать как состоящий из двух сплошных слоев — слоя клетчатки и слоя, образованного порами (рис. 77, *а*). Если рассматривается один слой бумаги, то в слой пор входят внутренние поры и прослойки между поверхностью бумаги и поверхностью обкладок. При многослойном диэлектрике в объем пор входят и прослойки между листами.

Система твердая фаза (клетчатка) — поры эластична; при изменении расстояния между обкладками за счет различной степени сжатия объем пор и толщина бумаги изме-

няются, а объем и толщина слоя клетчатки при этом остаются неизменными.

Толщину бумаги, определяемую в соответствии с ГОСТ 7514—55, назовем номинальной толщиной $d_н$. Она определяется как среднее арифметическое из десяти измерений толщины пачки бумаги, деленное на число листов в пачке. Для бумаг толщиной 7—12 *мк* в пачке берется 10 листов, для бумаги толщиной 15—30 *мк* пачку складывают из 5 листов. Толщина измеряется микрометром при удельном давлении 1 *кГ/см*² и площади измерительной поверхности не менее 0,5 *см*². Если диэлектрик состоит из

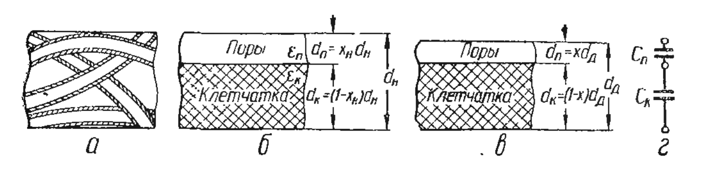


Рис. 77. Структура и схема замещения пропитанной бумаги:
а — структура бумаги; *б* — идеализированная структура бумаги; *в* — бумага в сжатом состоянии; *г* — эквивалентная схема двухслойного диэлектрика.

нескольких слоев бумаги, то под его номинальной толщиной понимают номинальную толщину одного листа, умноженную на число слоев бумаги. Номинальной толщине соответствует определенный объем пор, характеризуемый величиной $x_н$.

Если в диэлектрике выделить параллелепипед с площадью основания 1 *см*² и высотой, равной толщине диэлектрика $d_н$, то толщина пор, собранных вместе (рис. 77, *б*),

$$d_п = x_н d_н, \tag{3-1}$$

а толщина слоя клетчатки

$$d_к = (1 - x_н) d_н. \tag{3-2}$$

В секции конденсатора удельное давление может быть иным, т. е. не 1 *кГ/см*², и толщина диэлектрика, определяемая расстоянием между внутренними поверхностями обкладок, может отличаться от номинальной. Обозначим действительную толщину диэлектрика $d_д$, а соответствующий ей изменившийся объем пор x (рис. 77, *в*).

Так как толщина твердой фазы — слоя клетчатки — остается при различном сжатии неизменной, то

$$d_к = (1 - x)\, d_д = (1 - x_н)\, d_н,$$

откуда

$$x = 1 - (1 - x_н) \frac{d_н}{d_д}. \tag{3-3}$$

Отношение номинальной толщины диэлектрика к его действительной толщине называется коэффициентом запрессовки диэлектрика

$$k_п = \frac{d_н}{d_д}. \tag{3-4}$$

Для выпускаемых конструкций бумажных конденсаторов величина коэффициента запрессовки колеблется в пределах 0,7 — 1,0.

Вводя коэффициент запрессовки в уравнение (3-3), получаем

$$x = 1 - (1 - x_н)\, k_п.$$

Номинальный объем пор

$$x_н = \frac{V_б - V_к}{V_б} = 1 - \frac{V_к}{V_б}, \tag{3-5}$$

где $V_к$ — объем клетчатки;

$V_б$ — объем бумаги, определенный при ее номинальной толщине.

Вес высушенной и непропитанной бумаги $G_б$ определится весом содержащейся в ней клетчатки $G_к$:

$$G_б = \gamma_б V_б = G_к = \gamma_к V_к, \tag{3-6}$$

где $\gamma_б$, $\gamma_к$ — плотности высушенной бумаги и клетчатки.

Плотность высушенной бумаги $\gamma_б$, если известна ее влажность $w\%$ и плотность $\gamma_б'$ во влажном состоянии, определяется по формуле

$$\gamma_б = \frac{100 - w}{100} \gamma_б'. \tag{3-7}$$

Из формулы (3-6) следует, что $\frac{V_к}{V_б} = \frac{\gamma_б}{\gamma_к}$, а

$$x_н = 1 - \frac{\gamma_б}{\gamma_к}. \tag{3-8}$$

Подставляя в формулу (3-3) значение $x_н$, получаем объемную долю пор при любом сжатии

$$x = 1 - \frac{\gamma_б}{\gamma_к} k_п. \tag{3-9}$$

Двухслойный диэлектрик клетчатка — поры можно представить эквивалентной схемой, состоящей из двух последовательно соединенных емкостей: $C_к$ — емкости клетчатки с толщиной $d_к$ и диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_к$ и $C_п$ — емкости пор, которые заполняются пропитывающим составом. Этой емкости соответствуют толщина $d_п$ и диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_п$ (рис. 77, *г*).

Суммарная емкость системы

$$C = \frac{C_к C_п}{C_к + C_п}. \tag{3-10}$$

Рассматривая емкости C, $C_к$, $C_п$ как плоские конденсаторы и рассчитывая емкость на единицу площади, формулу (3-10) можно переписать таким образом:

$$\frac{\varepsilon}{d} = \frac{\frac{\varepsilon_к}{d_к} \cdot \frac{\varepsilon_п}{d_п}}{\frac{\varepsilon_к}{d_к} + \frac{\varepsilon_п}{d_п}}.$$

Подставляя в полученную формулу $d_к = (1 - x)d$ и $d_п = xd$ и сокращая на d, получаем значение диэлектрической проницаемости пропитанного диэлектрика

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_к \varepsilon_п}{\varepsilon_к x + \varepsilon_п (1 - x)}. \tag{3-11}$$

Подставляя значение x из выражения (3-9), получаем формулу для диэлектрической проницаемости пропитанного диэлектрика с учетом степени запрессовки

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_к}{\frac{\varepsilon_к}{\varepsilon_п} - k_п \frac{\gamma_б}{\gamma_к}\left(\frac{\varepsilon_к}{\varepsilon_п} - 1\right)}. \tag{3-12}$$

Для клетчатки принимается $\gamma_к = 1{,}55$ *г/см²* и $\varepsilon_к = 6{,}5$.

С помощью рис. 78 можно оценить влияние коэффициента запрессовки на диэлектрическую проницаемость и, следовательно, на емкость бумажного конденсатора, пропитанного маслом ($\varepsilon_п = 2{,}2$).

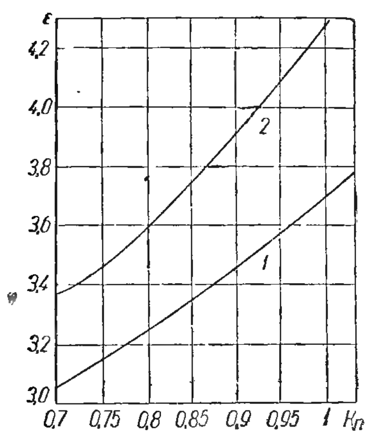


Рис. 78. Кривые зависимости диэлектрической проницаемости бумаги КОН-1 (*1*) и КОН-2 (*2*), пропитанной маслом, от коэффициента запрессовки.

На рис. 79 показан характер зависимости ε от $\varepsilon_п$ для трех значений x, соответствующих объемному весу (плотности) бумаги: $\gamma = 0{,}8$; 1,0 и 1,2 *г/см³* при $k_п = 1$. При значении $\varepsilon_п = \varepsilon_к = 6{,}5$ все кривые пересекаются; если $\varepsilon_п$ ниже этой величины, то при увеличении плотности бумаги (снижений x) увеличивается ε пропитанной бумаги. Это означает, что в области значений $\varepsilon_п$, меньших 6,5, в частности при использовании неполярных пропиточных масс, для увеличения удельной емкости конденсатора выгоднее применять более плотную бумагу. Однако в этом случае потери увеличатся. При сильно полярных массах с $\varepsilon_п > \varepsilon_к$ с точки зрения повышения удельной емкости выгоднее, наоборот, применять менее плотную бумагу.

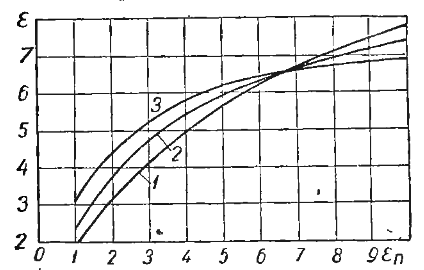


Рис. 79. Кривые зависимости диэлектрической проницаемости пропитанной бумаги от диэлектрической проницаемости пропиточной массы, при разных значениях объемного веса бумаги:
1 — $\gamma_б = 0{,}8$ *г/см³*; *2* — $\gamma_б = 1{,}0$ *г/см³*; *3* — $\gamma_б = 1{,}2$ *г/см³*.

При использовании отвердевающих масс за счет их усадки часть объема пор бумаги остается незаполненным. Следует перейти к использованию эквивалентной схемы, состоящей из трех последовательно включенных элементов: емкости клетчатки, емкости пропитывающего состава и емкости слоя воздуха, образовавшегося при усадке. Если

обозначить объемную усадку пропиточной массы при ее отвердевании и охлаждении до комнатной температуры y, то аналогично предыдущему легко получить выражение для диэлектрической проницаемости бумаги, пропитанной отвердевающей массой,

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_п \varepsilon_к}{(1-x)\varepsilon_п + xy\varepsilon_к\varepsilon_п + x(1-y)\varepsilon_к}. \qquad (3\text{-}13)$$

Подставляя значения диэлектрической проницаемости из уравнения (3-12) и действительной толщины диэлектрика из уравнения (3-4) в уравнения (1-43), (1-46), (1-50), можно получить формулы для расчета емкости плоской или намотанной секции конденсатора с учетом коэффициента запрессовки, величины диэлектрической проницаемости пропитывающего состава и плотности бумаги.

Потери в пропитанной бумаге

Представляя сопротивления, эквивалентные потерям ($r_к$ в клетчатке и $r_п$ в пропиточной массе), включенными последовательно с соответствующими емкостями $C_к$, $C_п$ (рис. 80), можно написать следующее выражение для тангенса угла потерь пропитанной бумаги:

$$\operatorname{tg}\delta = \omega C r = \omega \frac{C_к C_п}{C_к + C_п}(r_к + r_п), \qquad (3\text{-}14)$$

где C — суммарная емкость системы;

r — общее эквивалентное сопротивление.

Преобразовывая выражение (3-14), получим

$$\operatorname{tg}\delta = \omega C_к r_к \frac{C_п}{C_к + C_п} + \omega C_п r_п \frac{C_к}{C_к + C_п} =$$

$$= \frac{C_п}{C_п + C_к}\operatorname{tg}\delta_к + \frac{C_к}{C_п + C_к}\operatorname{tg}\delta_п, \qquad (3\text{-}15)$$

где $\operatorname{tg}\delta_к$ — тангенс угла потерь клетчатки;

$\operatorname{tg}\delta_п$ — тангенс угла потерь пропиточной массы.

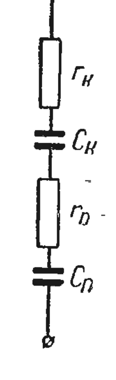


Рис. 80. Схема к расчету угла потерь пропитанной бумаги.

Используя данные, приведенные выше, окончательно получим

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\operatorname{tg}\delta_к}{1 + \frac{\varepsilon_к x}{\varepsilon_п (1 - x)}} + \frac{\operatorname{tg}\delta_п}{1 + \frac{\varepsilon_п (1 - x)}{\varepsilon_к x}}. \tag{3-16}$$

Если подставить в выражение (3-16) значение x из формулы (3-9), то получим выражение для тангенса угла потерь пропитанного бумажного диэлектрика с учетом коэффициента запрессовки

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\operatorname{tg}\delta_к}{1 + \frac{\varepsilon_к}{\varepsilon_п}\left(\frac{\gamma_к - k_п\gamma}{k_п\gamma}\right)} + \frac{\operatorname{tg}\delta_п}{1 + \frac{\varepsilon_п}{\varepsilon_к}\left(\frac{k_п\gamma}{\gamma_к - k_п\gamma}\right)}. \tag{3-17}$$

Для предварительных расчетов можно принимать $\operatorname{tg}\delta_к = (60 \div 70) \cdot 10^{-4}$, что соответствует температуре 20° С и частоте 50 *гц*.

Величина $\operatorname{tg}\delta_к$ зависит от остаточного содержания влаги в бумажном диэлектрике, т. е. от условий вакуумной сушки. Эту зависимость по данным Д. С. Варшавского при постоянной температуре сушки 120° С (характеризуя условия сушки величиной остаточного давления p *мм рт. ст.* в конце сушки при доведении процесса сушки до равновесного состояния, когда дальнейшее выделение воды из бумаги прекращается), можно представить уравнением

$$\operatorname{tg}\delta_к = \operatorname{tg}\delta_0 + K_1 \lg(K_0 p), \tag{3-18}$$

где, например, для бумаги КОН-1 Успенской фабрики было получено $\operatorname{tg}\delta_0 = 50 \cdot 10^{-4}$; $K_1 = 14{,}85 \cdot 10^{-4}$ и $K_0 = 10^3$.

Согласно этому выражению значение $\operatorname{tg}\delta_к = 65 \cdot 10^{-4}$ соответствует сушке конденсаторов при давлении $p = 0{,}01$ *мм рт. ст.*

При комнатной температуре или небольшом нагреве конденсатора (до 50—60° С) для хорошо очищенных пропиточных жидкостей можно полагать $\operatorname{tg}\delta_п \ll \operatorname{tg}\delta_к$ и пренебречь вторым членом в выражении (3-16). В этом случае увеличение потерь после пропитки обусловлено только тем, что поры бумаги вместо воздуха ($\varepsilon_п = 1$) заполняются пропиточной жидкостью с $\varepsilon_п > 1$. При этом общий знаменатель дроби в левом первом члене уравнения (3-16)

уменьшается и значение $\mathrm{tg}\delta$ увеличивается. Если пропиточная масса недостаточно очищена и ее $\mathrm{tg}\delta_п$ сравним по величине с $\mathrm{tg}\delta_к$, то вторым членом в уравнении (3-16) пренебрегать нельзя. Следует иметь в виду, что в этом случае расчет по формуле (3-16) с использованием значений $\mathrm{tg}\delta_п$, измеренных на обычных электродах для испытания жидких диэлектриков, имеющих зазор 1—2 *мм*, будет давать результаты обычно заметно превышающие опытные данные. Объясняется это тем, что в бумаге жидкость заключена в зазорах значительно меньшей толщины, что снижает потери от колебательного движения ионов жидкости при переменном электрическом поле. Поэтому только при измерении потерь в бумаге при малых значениях напряженности поля, когда такие потери становятся заметными, можно получить согласие опыта с расчетом. При значениях напряженности, соответствующих величине $E_р$, расчетное значение потерь оказывается завышенным. Следовательно, формулы (3-16) или (3-17) пригодны лишь для предварительных, ориентировочных расчетов.

Согласно формуле (3-17) с увеличением γ, т. е. с применением бумаги большей плотности, возрастает первое слагаемое и уменьшается второе. Таким образом, когда используется хорошо очищенная масса с малым $\mathrm{tg}\delta_п$, то с точки зрения снижения потерь пропитанного бумажного диэлектрика выгодно применять бумагу с пониженным объемным весом. В связи с этим в производственную практику вводится новый сорт бумаги с объемным весом $\gamma = 0{,}8$ *г/см³*. Из рис. 79 видно, что при пропитке такой бумаги неполярными массами, например маслом ($\varepsilon_п \approx 2$), заметно снижается ε бумажного диэлектрика в сравнении с бумагой КОН-1 ($\gamma = 1{,}0$ *г/см³*), так что снижение потерь будет сопровождаться заметным снижением емкости. Поэтому бумагу малой плотности следует применять в сочетании с полярными пропиточными массами, например пентахлордифенилом ($\varepsilon_п \approx 5$), когда снижение ε при снижении плотности бумаги оказывается незначительным.

При постоянном напряжении, когда величина $\mathrm{tg}\delta$ не имеет значения для оценки качества конденсатора, и при обычных пропиточных массах ($\varepsilon_п < \varepsilon_к = 6{,}5$) следует применять бумагу КОН-2 с повышенной плотностью. В этом случае не только увеличивается ε пропитанного диэлектрика, но и повышается его электрическая прочность.

Кратковременная электрическая прочность диэлектрика бумажных конденсаторов весьма высока и доходит при постоянном напряжении до 200—300 *кв/мм*. Это значительно выше допускаемых значений $E_р$, которые выбираются, исходя из условий работы бумажного конденсатора с учетом явления старения пропитанной бумаги при длительном воздействии напряжения. Тем не менее при расчете бумажных конденсаторов необходимо знать их кратковременную прочность, чтобы правильно выбрать необходимый запас прочности при установлении величины испытательного напряжения. Кроме того, при расчете конденсатора на кратковременный режим работы значения $E_р$ могут быть сильно увеличены и тогда величина кратковременной прочности может стать ограничивающим фактором.

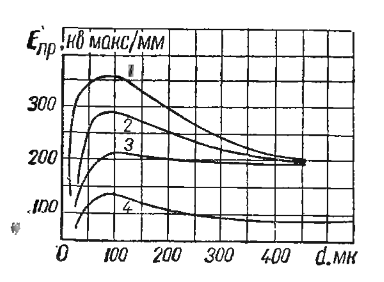


Рис. 81. Кривые зависимости кратковременной электрической прочности бумажно-масляных конденсаторов от толщины диэлектрика.

Кратковременная электрическая прочность бумажных конденсаторов прежде всего зависит от числа слоев бумаги между обкладками. Кривые такой зависимости, полученные по опытным данным на конденсаторных секциях емкостью порядка 0,1 *мкф*, пропитанных жидким диэлектриком, приведены на рис. 81 и 82. Кривые на рис. 81 построены по отечественным данным для конденсаторов, пропитанных нефтяным маслом. Кривые *1*, *2*, *3* получены при пробое воздействием постоянного напряжения, а кривая *4* — при

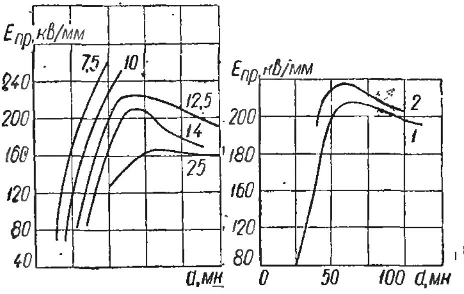


Рис. 82. Кривые зависимости кратковременной прочности бумажных конденсаторов, пропитанных пентахлордифенилом, от толщины диэлектрика.

переменном напряжении (указаны амплитудные значения); кривые *1* и *2* получены для бумаги с объемным весом 1,2 *г/см³*, а кривые *3* и *4* — для бумаги с объемным весом 1,0 *г/см³*. Толщина отдельного слоя бумаги в этих опытах составляла: кривая *1* — 8, *2* — 12, *3* — 15 и *4* — 12 *мк*. Оптимальная толщина диэлектрика, соответствующая максимуму электрической прочности, составляет 80—100 *мк*; в зависимости от толщины бумаги этому соответствует число слоев $n \approx 8 \div 10$. С уменьшением толщины бумаги максимальное значение электрической прочности возрастает, но при этом увеличивается стоимость конденсатора (см. табл. 15). С увеличением объемного веса электрическая прочность бумаги повышается.

На рис. 82 показаны кривые, построенные по зарубежным данным для конденсаторов, пропитанных пентахлордифенилом, намотанных из бумаги с объемным весом 0,9 *г/см³*. В левой части рисунка показано влияние толщины отдельного слоя бумаги на характер зависимости $E_{пр} = f(d)$; цифры у кривых — толщина бумаги в микронах. Испытание проведено при быстром повышении до пробоя напряжения постоянного тока. На правой части рисунка дано сравнение $E_{пр}$ при постоянном напряжении (кривая *1*) и при стандартном униполярном импульсе (кривая *2*). Испытания проведены на конденсаторах, намотанных из бумаги толщиной 12,5 *мк*. В этих опытах оптимальная толщина несколько меньше, чем на рис. 81, и составляет 60—70 *мк*. Можно полагать, что в данном случае для опыта использовались секции меньшей емкости. Порядок максимальных значений $E_{пр}$ близок к тем данным, которые приведены на рис. 81 с учетом различия в плотности и толщине бумаги.

Прочность при импульсах оказывается лишь не намного выше, чем при кратковременном воздействии постоянного напряжения. Эффективное значение $E_{пр}$ при переменном напряжении технической частоты примерно в 2 раза меньше соответствующих значений $E_{пр}$ при постоянном напряжении. При переходе в область средних частот кратковременная электрическая прочность заметно снижается: изменение частоты от 50 *гц* до 1—10 *кгц* может дать снижение $E_{пр}$ в 2 — 3 раза.

Для оценки зависимости кратковременной электрической прочности при небольшом числе слоев от емкости конденсаторов можно воспользоваться кривыми, построенными по опытным данным (рис. 83). Кривые *1* и *2* построены по оте-

чественным данным для конденсаторов, пропитанных вазелином, а кривые *3* и *4* — по английским данным для конденсаторов, пропитанных маслом; кривые *1* и *3* — три слоя бумаги по 8 *мк*; кривые *2* и *3* — два слоя бумаги по 8 *мк*; во всех случаях бумага с объемным весом 1,2 *г/см³*. Испытание проводилось при постоянном напряжении. Данные рис. 83 удовлетворяют эмпирической зависимости (1-12). При большем числе слоев бумаги пересчитать значения $E_{пр}$ от

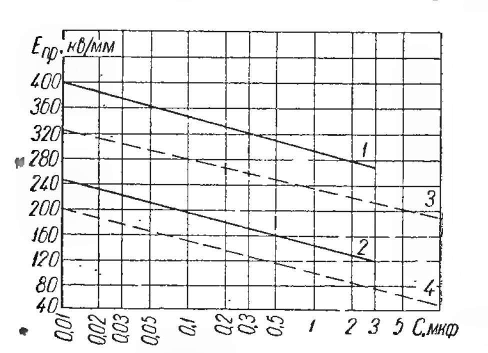


Рис. 83. Кривые зависимости кратковременной электрической прочности бумажных конденсаторов от величины емкости (влияние площади обкладок).

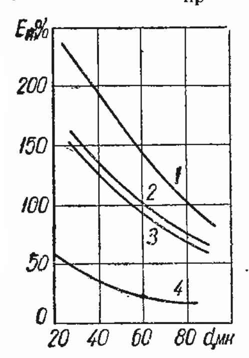


Рис. 84. Кривые зависимости ионизирующей напряженности в диэлектрике бумажных конденсаторов от толщины диэлектрика (50 *гц*).

меньшей площади к большей можно, пользуясь законами математической статистики.

Необходимо иметь в виду, что все опытные данные, по которым построены кривые, показанные на рис. 81, 82, 83, являются средними значениями, которым соответствует интегральная вероятность пробоя порядка 50%. Взяв запас по отношению к средним значениям порядка 2, можно резко снизить вероятность пробоя до величины не более нескольких процентов или меньше.

При выборе значений $E_р$ с учетом старения диэлектрика приходится прежде всего ориентироваться на устранение опасности развития ионизации в диэлектрике конденсатора при рабочем режиме. Зависимость ионизирующей напряженности поля $E_и$ при частоте 50 *гц* от толщины бумажного диэлектрика при различных видах пропитки показана в виде кривых на рис. 84. В билогарифмическом масштабе

эта зависимость может быть выражена наклонной прямой

$$\lg E_{и} = A - 0{,}5 \lg d. \qquad (3\text{-}19)$$

Из кривых на рис. 84 видно существенное влияние типа пропиточной жидкости на величину $E_{и}$; вязкий пентахлордифенил (кривая *3*) дает несколько меньшие значения $E_{и}$ в сравнении с маловязким нефтяным маслом (кривая *2*), но трихлордифенил (кривая *1*), представляющий собой маловязкую полярную жидкость, дает заметно увеличенные значения $E_{и}$. Для сравнения приведены данные для непропитанных конденсаторов (кривая *4*). Для бумажно-масляных силовых конденсаторов можно использовать уравнение (3-19), полагая в нем значение $A = 2{,}65$ и выражая толщину диэлектрика в микронах. При толщине 50—60 *мк*, принятой для секций конденсаторов переменного напряжения, величина $E_{и} = 63 \div 57$ *кв/мм*; при толщине, соответствующей оптимальному значению, обеспечивающему максимум кратковременной прочности, т. е. при 80—100 *мк*, значения $E_{и}$ снижаются до 50—45 *кв/мм*. В соответствии с этим были рекомендованы толщины 50—60 *мк*, обеспечивающие выигрыш в величине $E_{и}$ на 20% при относительно небольшом снижении $E_{пр}$.

Для бумажно-масляных конденсаторов значения $E_{и}$, о которых здесь идет речь, представляют верхнюю границу напряженности начала ионизации. При воздействии даже кратковременных перенапряжений, превышающих эту границу, величина $E_{и}$ резко снижается, достигая нижней границы $E_{и.\,мин}$. Зависимость этого значения $E_{и}$ от толщины также описывается уравнением (3-19), но значение A для $E_{и.\,мин}$ снижается до 1,85. При толщине 50 *мк* минимальное значение напряженности начала ионизации будет составлять всего лишь 10 *кв/мм*.

Поэтому при выборе значений $E_{р}$ для конденсаторов переменного напряжения надо выбирать коэффициент запаса по отношению к верхней границе $E_{и}$ с таким расчетом, чтобы он превышал величину отношения возможных систематических перенапряжений к $E_{р}$ в условиях эксплуатации конденсаторов. Следует отметить, что при пропитке хлорированными массами верхняя граница $E_{и}$ более устойчива к воздействию перенапряжений. Следовательно, можно повышать значения $E_{р}$ для такого вида пропитки в сравнении с пропиткой маслом, когда допускаемая напряженность ограничивается соображениями об устранении ионизации.

С увеличением частоты резко увеличивается интенсивность ионизации, но относительно мало изменяется величина $E_и$; можно полагать, что при переходе от 50 *гц* к частотам порядка 1—10 *кгц* величина $E_и$ для бумажного конденсатора с жидкой пропиткой снижается не более чем в 2 раза. С повышением температуры конденсатора до известных пределов кратковременная электрическая прочность бумажных конденсаторов изменяется мало. При переходе от 20 к 100° С снижение $E_{пр}$ для бумажно-масляных конденсаторов не превышает 15—20%, при нагреве от 20 до 60° С — 5—10%. Напряжение начала ионизации в этих пределах температуры обычно даже несколько возрастает. При снижении температуры до точки застывания вязких пропиточных масс может наблюдаться как снижение $E_и$, так и снижение $E_{пр}$, так как при отвердевании пропиточной массы возможно образование пустот в порах бумажной изоляции, служащих очагами для развития ионизации.

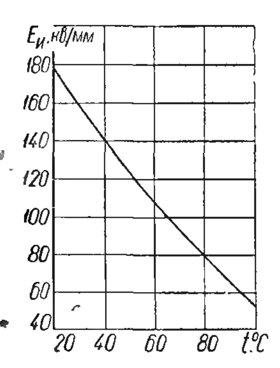


Рис. 85. Кривая зависимости ионизирующей напряженности при постоянном напряжении для бумажно-масляных конденсаторов от температуры.

Ранее считалось, что при постоянном напряжении ионизация не является ограничивающим фактором при выборе $E_р$ для бумажного конденсатора; полагали, что природа старения в этом случае носит чисто электрохимический характер. Действительно, для хорошо пропитанного бумажно-масляного конденсатора герметизированной конструкции при комнатной температуре значения $E_и$ приближаются к значениям $E_{пр}$, а иногда пробой при испытании может наступить даже раньше, чем будут обнаружены первые признаки развития ионизации. Однако, если конденсатор пропитан отвердевающей массой, то значения $E_и$ могут быть заметно уменьшены в сравнении с $E_{пр}$. При пропитке жидкой массой, когда наличие остаточного газа сведено к предельному минимуму, заметное снижение $E_и$ можно наблюдать при повышении температуры (рис. 85). Кривая на этом рисунке показывает, что при температуре 100° С значения $E_и$ уже приближаются к значениям $E_р$, применяемым для бумажно-масляных конденсаторов при нормальных температурах. Поэтому одной из причин, за-

ставляющих снижать $E_р$ бумажных конденсаторов постоянного напряжения с ростом их рабочей температуры, может являться и необходимость исключить опасность развития ионизации.

Значения $E_р$, которые применяются на практике при конструировании различных типов бумажных конденсаторов и учитывают как ионизационное, так и электрохимическое старение, а также опасность нарушения теплового равновесия конденсатора, приводятся ниже.

§ 12. БУМАЖНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ НА НАПРЯЖЕНИЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДО 1500 *В*

К этой группе относятся радиоконденсаторы, применяемые в радиоприемной и телевизионной аппаратуре, работающие при температурах до 70° С и выпускаемые при относительно небольших емкостях, обычно до 0,25—0,5 *мкф*, в цилиндрических корпусах, а при более высокой емкости — в прямоугольных корпусах с применением плоскопрессованных секций. Конденсаторы этой группы применяются также в различной электронной аппаратуре, в телефонии и телеграфии, в устройствах автоматики и телемеханики и т. д. В некоторых случаях верхний предел рабочей температуры этих конденсаторов расширяется до 85—100° С и даже до 125—150° С.

Обычно конденсаторы рассчитываются на номинальное рабочее напряжение постоянного тока, но иногда приходится учитывать наложение на постоянное напряжение значительной переменной составляющей или даже возможность использования конденсатора при чистом переменном напряжении. Для пропитки конденсаторов этого типа могут применяться как твердые, так и жидкие пропитывающие массы неполярного и полярного типов. В связи с этим значение ε и допускаемая напряженность поля $E_р$ могут измениться в достаточно широких пределах. При расчете конденсатора надо выбирать пропиточную массу и тип бумаги, руководствуясь указаниями, приведенными в предыдущем параграфе.

Выбрав пропиточную массу и бумагу с определенным значением плотности, можно рассчитать ε диэлектрика бумажного конденсатора, пользуясь формулой (3-11) или (3-12). Для учета наличия зазоров, заполненных прослойками пропиточной массы, в результаты расчета по этим формулам надо внести поправку, снижая расчетное значение

ε примерно на 10%. При расчете необходимой площади обкладки вместо ε иногда пользуются коэффициентом $K_н$, представляющим собой значение площади обкладки, отнесенное к единице емкости и единице толщины диэлектрика. Если выразить $K_н$ в *см²/мкф·мк*, то получим

$$K_н = \frac{567}{\varepsilon}. \qquad (3\text{-}20)$$

Определяя $K_н$ измерением площади обкладок размотанных опытных секций с известной емкостью и толщиной диэлектрика, можно более точно учесть степень сжатия диэлектрика в секции, т. е. наличие в нем зазоров, а также учесть отличие фактической толщины использованной бумаги от ее номинального значения, используемого при расчете. Пригодные для предварительных расчетов значения коэффициента $K_н$ и соответствующие им значения ε для разных типов пропиточных масс при двух значениях плотности бумаги приведены в табл. 17. При постоянном напряжении обычно используют бумагу повышенной плотности.

Таблица 17

Значения ε пропитанной конденсаторной бумаги и коэффициента $K_н$ при двух значениях плотности бумаги и различных пропиточных массах

Пропиточная масса	Диэлектрическая проницаемость массы, $\varepsilon_п$	Плотность 1,0 *г/см³*		Плотность 1,2 *г/см³*	
		ε	$K_н$	ε	$K_н$
Твердая (усадка 15%):					
парафин, церезин	2,2	3,5	162	4,2	135
синтетический церезин	2,5	3,7	153	4,4	129
хлорнафталин	5,0	4,9	116	5,25	108
ланостерол	10,0	5,8	98	5,9	96,5
Жидкая:					
нефтяное масло, вазелин, октол	2,2	3,7	153	4,5	126
кремнийорганическая жидкость	2,5	4,1	138	4,8	118
касторовое масло	4,5	5,6	101	6,0	94,5
хлордифенил	5,0	6,0	94,5	6,15	92,5
нитросовол	7,0	6,75	84	6,17	92

Примечание. При пропитке твердыми массами типа полимеризующихся смол усадка меньше, чем для указанных здесь твердых воскообразных веществ, и при равных значениях $\varepsilon_п$ величина ε пропитанной бумаги несколько повышается.

Определив $K_н$ и толщину диэлектрика d (*мк*) по заданной емкости C (*мкф*), находим площадь обкладок

$$S = K_н C d \ см^2. \qquad (3\text{-}21)$$

Для определения толщины диэлектрика по заданному значению рабочего напряжения находится значение допускаемой напряженности поля $E_р$. Выбор рабочей напряженности поля для конденсаторов рассматриваемого типа зависит от требуемого срока службы, рабочей температуры, номинальной емкости, а также от числа слоев бумаги между обкладками и толщины отдельного слоя бумаги.

Обычно конденсаторы радиотипа рассчитаны на верхний предел температуры 70° С и на срок службы при непрерывной работе порядка 5000—10 000 *ч*, что эквивалентно работе в широковещательной аппаратуре порядка 4—5 лет. Практически за это время могут быть только случайные пробои отдельных дефектных образцов, которые не удается отбраковать при заводских испытаниях. Средний срок службы, характеризуемый пробоем 50% образцов в партии, значительно превышает указанные здесь 5000—10 000 *ч*. В табл. 18 и 19 приведены значения $E_р$ для указанных режимов работы при разных значениях толщины бумаги и разном числе ее слоев между обкладками.

Данные табл. 18 соответствуют старой зарубежной практике пропитки воскообразными диэлектриками, при которой верхний предел температуры не превышает 70° С.

В этом случае при малых емкостях, порядка 0,01—0,1 *мкф*, можно применять $E_р$ до 10—11 *кв/мм* постоянного тока при 2 слоях бумаги и до 12—13 *кв/мм* при 3 слоях бумаги. Для новых типов полимеризующихся смол, применяемых в качестве пропиточной массы, верхний предел рабочей температуры для конденсаторов небольшой емкости можно повышать до 100—125° С. Допускаемая напряженность поля при такой пропитке еще недостаточно изучена. Ориентировочно можно взять для предварительных расчетов данные табл. 18, считая, что ухудшение условий работы за счет повышения температуры в известной степени компенсируется повышением электрической прочности в связи с уменьшенной усадкой смол по сравнению с воскообразными веществами, а также тем, что данные таблицы относятся к повышенной емкости, а будут использованы для пониженной, т. е. при меньших значениях площади обкладок.

Таблица 18

Значения допускаемой рабочей напряженности поля для бумажных радиоконденсаторов с твердой пропиткой; температура до 70° С, непрерывная работа в течение 5000—10 000 *ч*, *С* = 0,1÷1 *мкф*

Толщина и число слоев бумаги	Допускаемая напряженность, *кв/мм*	
	Постоянное напряжение	50 *гц*
(7— 8 *мк*) × 2	5—7	4,5—5
(9—15 *мк*) × 2	9	5,5
(7—15 *мк*) × 3 или более . .	11—11,5	5,5

Таблица 19

Значения допускаемой рабочей напряженности поля для бумажных конденсаторов с жидкой пропиткой; непрерывная работа в течение 5000—10 000 *ч*, *С*=0,1÷1 *мкф*, постоянное напряжение

Толщина и число слоев бумаги	Допускаемая напряженность, *кв/мм*		
	при 70° С	при 85° С	при 100° С
8 *мк* × 2	12,5	—	—
8 *мк* × 3	16,7	12,5	8,3
10 *мк* × 3	20	—	—
8 *мк* × 4	—	18,7	12,5
10 *мк* × 4	25	25	15
10 *мк* × 5	30	30	20
10 *мк* × 6	—	33,4	25

Данные табл. 19 соответствуют отечественным конденсаторам, пропитанным вазелином. Цифры для температуры 70° С соответствуют старой серии конденсаторов КБГ, а потому несколько занижены. Цифры для 85—100° С соответствуют новой серии БГТ, при разработке которой использовались более полные данные о поведении конденсаторов в условиях длительной работы при постоянном напряжении и повышенной температуре, что позволило несколько снизить запас по электрической прочности при выборе $E_р$. Для конденсаторов, пропитанных вазелином или маслом, при емкости порядка 0,01—0,1 *мкф* цифры, приведенные в табл. 19, можно повышать на 10—15%. В настоящее время появилась возможность применять особо тонкие бумаги (5—6 *мк*). В этих бумагах сильнее сказываются слабые места, в особенности проводящие частицы, а потому $E_р$ следует брать ниже, чем в более толстых бумагах. При постоянном напряжении и температуре до 70° С для диэлектрика 2 × 5 *мк* при емкости порядка 0,5—1 *мкф* можно рекомендовать значение $E_р = 5 \div 6$ *кв/мм*.

Допускаемое значение переменного напряжения при частотах 50 и 500 *гц* для стандартных бумажных конденсаторов типа КБГ (до 70° С) показано в табл. 20. Пользуясь данными табл. 20, можно по заданному значению переменного

Таблица 20

Зависимость допускаемого переменного напряжения для конденсаторов типа КБГ от номинального постоянного напряжения (жидкая пропитка)

Номинальное напряжение (постоянный ток), *в*	Переменное напряжение (эффективное значение), *в*			
	Частота 50 *гц*		Частота 500 *гц*	
	до 2 *мкф*	4—10 *мкф*	до 2 *мкф*	4—10 *мкф*
200	160	130	100	50
400	250	200	125	75
600	300	250	150	100
1000	400	350	200	150
1500	500	—	250	—

Таблица 21

Допускаемые рабочие напряжения постоянного тока для конденсаторов типа БГТ при двух значениях предельной температуры и двух значениях срока службы

Рабочее напряжение, *в*				Отношение $\frac{U_{500}}{U_{5000}}$	
при 85° С		при 100° С		при 85° С	при 100° С
5000 *ч*	500 *ч*	5000 *ч*	500 *ч*		
300	350	200	25	1,17	1,25
600	700	400	500	1,17	1,25
1000	1100	600	750	1,10	1,25
1500	1700	1000	1200	1,13	1,20
2000	2250	1500	1800	1,25	1,195

напряжения найти соответствующее ему номинальное постоянное напряжение и по его величине выбрать нужную толщину диэлектрика.

Если конденсатор должен работать при постоянном напряжении с наложенной на него переменной составляющей, соблюдается правило, по которому сумма постоянного напряжения, реально приложенного к конденсатору, и амплитуды переменной составляющей не должна превышать соответствующего номинального напряжения конденсатора.

Определив эту сумму и выбрав номинальное напряжение, можно найти нужную толщину диэлектрика. Допустимые при таком расчете значения переменной составляющей,

в зависимости от частоты, имеют следующие значения (указана амплитуда переменной составляющей в % от номинального постоянного напряжения): 50 *гц* — 20%, 100 *гц* — 15%, 300 *гц* — 10%, 1000 *гц* — 5%, 10 *кгц* — 2%. Если амплитуда или частота превышают указанные значения, надо рассчитать дополнительный нагрев конденсатора, создаваемый переменной составляющей, и, если он достигает опасных значений, учесть это при конструировании конденсатора.

Приведенные выше значения $E_р$ относятся к длительной непрерывной работе 5000—10 000 *ч*. Если проектируется конденсатор с сокращенным сроком службы, то значение $E_р$ можно повысить. При постоянном значении температуры срок службы (в первом приближении) обратно пропорционален приложенному напряжению в некоторой степени m, для которой указываются значения от 4 до 6, в среднем 5 (закон пятой степени). При $m = 5$ и сокращении срока службы в 10 раз допустимое напряжение повышается на 58% (увеличение в 1,58 раз). На практике обычно подходят к повышению напряжения при сокращении срока службы более осторожно, как показывают данные табл. 21, соответствующие бумажным конденсаторам типа БГТ.

Таблица 22

Выбор ширины закраины

Испытательное напряжение (постоянный ток), *в*	Ширина закраины, *мм*	
	Намотка со скрытой фольгой	Намотка с выступающей фольгой
1500 или ниже	2	3
1600—2000 . . .	2,5	4
2100—3000 . . .	3	5

На эти данные можно ориентироваться при выборе $E_р$ при сокращенном сроке службы.

Испытательное напряжение для конденсаторов радиотипа обычно принимается равным утроенному рабочему номинальному напряжению, но при $U_н$ = 1500 *в* и выше — двойному номинальному. Величину закраины следует выбирать, исходя из испытательного напряжения, при котором не должен наблюдаться разряд по закраине, руководствуясь данными табл. 22.

Если задано испытательное переменное напряжение (эффективное), то закраину следует увеличить в 1,5 раза по сравнению с соответствующей постоянному напряжению той же величины.

Пример 1. Рассчитать конденсатор для радиоприемной аппаратуры при номинальном напряжении постоянного тока 400 *в*, емкости 0,05 *мкф*, максимальной рабочей температуре 70° С. Полная герметизация конструкции не требуется.

Выбираем плотную бумагу КОН-2 (1,2 *г/см*³) и пропитку полихлорнафталином (галоваксом) для повышения удельной емкости. Тогда по формуле (3-13) при $x = 1 - \frac{1,2}{1,55} = 0,225$ и $y = 0,15$

$$\varepsilon = \frac{5 \cdot 6,5}{(1 - 0,225)\,5 + 0,225 \cdot 0,15 \cdot 6,5 \cdot 5 + 0,225\,(1 - 0,15)\,6,5} = \frac{32,5}{6,1} = 5,3.$$

Учитывая, что емкость невелика, принимаем $E_{\text{р}}$ выше, чем указано в табл. 18, и равным 13 *кв/мм*. В этом случае толщина диэлектрика будет равна $400/13 = 30,7 \cdot 10^{-3}$ *мм* = 30,7 *мк*. Берем диэлектрик из трех слоев бумаги по 10 *мк*. Предполагаем, что секция имеет цилиндрическую форму, т. е. не подвергается прессовке. Снижая расчетное значение ε на 10%, получаем $\varepsilon = 0,9 \cdot 5,3 = 4,75$.

Принимаем ширину бумаги равной 30 *мм*. Предполагая, что намотка будет с выступающей фольгой (для уменьшения потерь и индуктивности), взяв закраину равной 3 *мм* и выступающий край фольги 3 *мм*, находим ширину $b = 30 + 3 - 3 = 30$ *мм*. Берем алюминиевую фольгу шириной 30 *мм* и толщиной 7 *мк*. Активная ширина фольги $b_{\text{а}} = 30 - 2 \cdot 3 = 24$ *мм*. Диаметр намоточной оправки выбираем $D_0 = 3$ *мм*. Вычисляем в формуле (1-55) для определения наружного диаметра секции коэффициент

$$k_{\text{н}} = \frac{0,144\,(30 + 7)\,30}{4,75 \cdot 2,4} = 14.$$

Вычисляем наружный диаметр намотанной секции, используя формулу (1-55),

$$D = \sqrt{0,3^2 + 14 \cdot 0,05} = 0,89 \text{ см}.$$

Число витков секции находим по формуле (1-56)

$$w = \frac{2,5 \cdot 10^3\,(0,89 - 0,3)}{3 \cdot 10 + 7} = 40.$$

Используем в качестве корпуса винипластовую трубку: внутренний диаметр 11 *мм*, толщина стенок 1,5 *мм*, наружный диаметр 14 *мм*. С учетом выступающих с торцов фольги и припайки вывода принимаем длину секции на 2 *мм* более ширины бумаги, т. е. 32 *мм*. Считая на заливку торцов по 5 *мм* с каждого торца, получаем длину корпуса 42 *мм*. Для заливки используем эпоксидную смолу. Таким образом, получили следующие размеры конденсатора: диаметр 14 *мм* и длина 42 *мм*. Объем конденсатора $\frac{3,14 \cdot 1,4^2}{4} \cdot 4,2 = 6,5$ *см*³. Удельный объем составляет $\frac{6,5}{0,05} = 130$ *см*³/*мкф*; $c_{\text{уд}} = 0,0077$ *мкф/см*³. Определим вес конденсатора. Активная площадь фольги в нем составляет

$$K_{\text{и}}Cd = 108 \cdot 0,05 \cdot 30 = 175 \text{ см}^2.$$

При активной ширине 2,4 *см* длина лент фольги $\frac{175}{2,4} = 73$ *см*. Вес фольги в конденсаторе $2 \cdot 73 \cdot 3 \cdot 2,7 \cdot 7 \cdot 10^{-4} = 0,8$ *г*.

Бумажная лента несколько длиннее фольги за счет 2—3 защитных витков («холостых») в конце и начале намотки. Длина первого витка $\pi \cdot 0,3 = 0,95$ *см*, длина последнего витка $\pi \cdot 0,98 = 3,08$ *см*. Принимаем увеличение длины бумажной ленты в сравнении с длиной фольги $2 \cdot 4 = 8$ *см*. Тогда длина бумажных лент $l_б = 73 + 8 = 81$ *см*. Вес бумаги в конденсаторе $2 \cdot 3 \cdot 10 \cdot 10^{-4} \cdot 81 \cdot 3 \cdot 1,2 = 1,75$ *г*. Объем

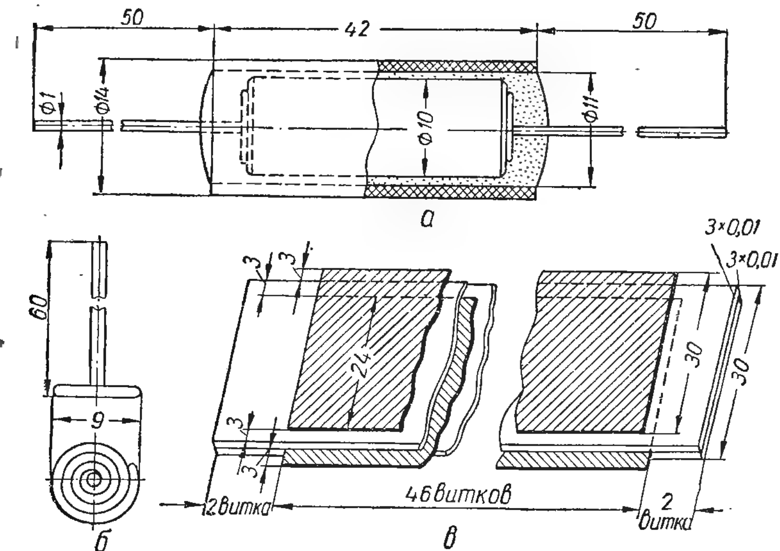


Рис. 86. К расчету цилиндрического конденсатора с бумажным диэлектриком:

а — общий вид с разрезом; *б* — вывод; *в* — схема развертки намотанной секции.

бумаги в конденсаторе $1,75/1,2 = 1,45$ *см*³. Относительный объем пор $1 - 1,2/1,55 = 0,225$. Объем впитанного хлорнафталина $0,22 \cdot 1,45 = 0,325$ *см*³. С учетом налипания пропиточной массы на поверхность секции принимаем ее полный объем 0,5 *см*³ и при удельном весе хлорнафталина 1,5 *г/см*³ получаем вес пропиточной массы в конденсаторе 0,75 *г*.

Принимая длину выводных проводников с учетом их припайки к торцу секций по 60 *мм* при диаметре 1 *мм* (для меди удельный вес 8,9 *г/см*³), получаем вес выводных проводников $2 \cdot 6\frac{\pi}{4} \cdot 0,1^2 \quad 8,9 = 0,85$ *г*. Принимая удельный вес винипласта 1,4 *г/см*³, находим вес корпуса $\frac{\pi}{4}(1,4^2 - 1,1^2) \cdot 4,2 \cdot 1,4 = 3,45$ *г*. Объем с обоих торцов на заливку $2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 1,1^2 \cdot 0,5 = 0,95$ *см*³.

Принимая удельный вес эпоксидной смолы равным 1,25 *г/см³* и несколько увеличив объем, учитывая затекание смолы в щель между секцией и стенкой корпуса, а также выступаиие за края торцов, получаем вес заливочной массы в конденсаторе $1{,}25 \cdot 1{,}3 = 1{,}66$ *г*. Полный вес конденсатора $0{,}8 + 1{,}75 + 0{,}75 + 0{,}85 + 3{,}45 + 1{,}6 = 9{,}2$ *г*. Удельный вес конденсатора составляет $9{,}2/0{,}05 = 184$ *г/мкф*.

Чертеж спроектированного конденсатора приведен на рис. 86.

Пример 2. Рассчитать конденсатор для тяжелых условий работы: температура 100° С, влажность окружающей среды до 100%. Номинальное рабочее напряжение 600 *в*, емкость 1 *мкф*. Требуется герметизация с применением сварки, так как пайка мягким припоем при 100° С рабочей температуры ненадежна.

Выбираем плотную бумагу КОН-2 (1,2 *г/см³*) и пропитку новой неполярной жидкостью «октол», отличающейся повышенным удельным сопротивлением, что весьма важно при высокой рабочей температуре. По табл. 17 находим значение ε для пропитанной бумаги, равное 4,5 (как при неполярных жидких массах: масло или вазелин). По табл. 19 выбираем $E_р = 15$ *кв/мм*.

В этом случае толщина диэлектрика равна $600/15 = 40$ *мк*. Берем 4 слоя бумаги по 10 *мк*. Испытательное напряжение принимаем равным $3\ U_н$(1800 *в*). Принимаем намотку со скрытой фольгой, находим по табл. 22 велпчину закраины 2,5 *мм*. В качестве обкладок берем алюминиевую фольгу 7,5 *мк* толщиной и 35 *мм* шириной. Тогда ширина бумаги $b = 35 + 2 \cdot 2{,}5 = 40$ *мм*. Предположим, что необходимо обеспечить стандартную наружную ширину корпуса 45 *мм*. Определим, исходя из этого, размеры секции и число ее витков. Учитывая, что секция не будет сильно сжата, принимаем величину $\varepsilon = 0{,}9 \cdot 4{,}5 \approx 4{,}0$. Тогда коэффициент $K_н = 567/4 = 141{,}5$ *см²/мкф · мк*. Активная площадь обкладок $S_а = 141{,}5 \cdot 1{,}40 = 5670$ *см²*.

Длина обкладок (длина одной ленты фольги) $l_о = 5670/3{,}5 = 1650$ *см*. Учитывая наличие холостых витков в начале и конце намотки, принимаем длину бумажных лент $l_б = 1655$ *см*. Сечение секции, перпендикулярное оси ее намотки, определяется суммарной толщиной двух лент фольги и удвоенного значения толщины диэлектрика, умноженных на длину бумажных лент: $F = 2\,(7{,}5 + 40) \cdot 10^{-4} \cdot 1655 = 15{,}7$ *см²*. Принимая толщину стенок корпуса 0,5 *мм* и толщину изоляции от корпуса 0,3 *мм*, получаем максимальную ширину секции $b_с = 45 - 2 \cdot 0{,}5 - 2 \cdot 0{,}3 = 43{,}4$ *мм*. Принимая $b_с = 4{,}3$ *см*, находим второй размер сечения секции $\frac{F}{b_с} = 15{,}7/4{,}3 = 3{,}67$ *см*. Сечение секции получается почти квадратным, что технологически неудобно, поэтому разбиваем конденсатор на две параллельно включенные секции по 0,5 *мкф*. Толщину секции берем равной половине полезной ширины корпуса: $\Delta_с = 4{,}3/2 \approx 2{,}1$ *см* (округление в сторону уменьшения, чтобы секции свободнее вошли в корпус). Число витков секции находим по соотношению

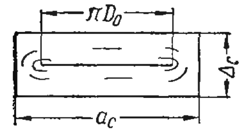
$$w = \frac{\Delta_с}{4\,(d_о + nd_б)} = \frac{2{,}1}{4\,(7{,}5 + 40)\,10^{-4}} = \frac{10\,500}{95} = 110 \text{ витков.}$$

Идеальное сечение секции представляет собой прямоугольник с размерами $\Delta_с$ и $a_с$, причем второй отличается от первого на

ширину первого витка, равного половине длины окружности намоточной оправки $\pi D_0 : a_c = \frac{F}{2\Delta_c} = \frac{15,7}{2 \cdot 2,1} = 3,74$ *см*. Отсюда находим необходимый размер намоточной оправки

$$D_0 = \frac{2}{\pi}(a_c - \Delta_c) = \frac{2}{\pi}(3,74 - 2,1) = 1,05 \text{ см}.$$

Фактически края секции не прямые, а закругленные, как показано на рис. 87. В этом случае фактическое значение максимальной ширины секции, по которому надо выбирать соответствующий размер корпуса,



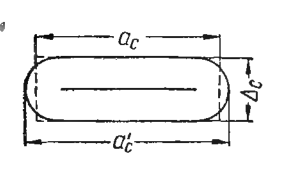


Рис. 87. К расчету размеров плоскопрессованной секции.

$$a'_c = \frac{\pi D_0}{2} + k\Delta_c. \tag{3-22}$$

При прессовке секций с ограничением по ширине коэффициент $k = 1,05 \div 1,10$, при прессовке без ограничения по ширине $k = 1,15 \div 1,25$. Полагая, что прессовка без ограничения по ширине, принимаем $k = 1,2$. Тогда $a'_c = \frac{\pi \cdot 1,05}{2} + 1,2 \cdot 2,1 = 4,17$ *см*.

С учетом толщины стенок корпуса и изоляции от него получаем размер корпуса, соответствующий ширине секции $41,7 + 2 \cdot 0,5 + 0,3 = 43,4$ *мм*. Принимаем размер корпуса 45 *мм*. Следовательно, габаритные размеры основания корпуса составят 45×45 *мм*. Проверим число витков секции по формулам (1-56). Находим коэффициент

$$k_н = \frac{0,144\,(40 + 7,5)\,40}{4 \cdot 3,5} = 19,6.$$

Определяем величину наружного диаметра намотанной секции, пока она еще не снята с оправки,

$$D = \sqrt{1,05^2 + 19,6 \cdot 0,5} = 3,3 \text{ см}.$$

Тогда число витков

$$w = \frac{2,5 \cdot 10^3\,(3,3 - 1,05)}{40 + 7,5} = \frac{5650}{47,5} = 118.$$

Учитывая два дополнительных холостых витка, получаем общее число витков, близкое к тому, которое было получено при расчете по толщине секции.

Высота секций конденсатора определяется шириной бумаги с небольшим сдвигом при намотке (до 1 *мм*). С учетом толщины дна корпуса (0,5 *мм*) и толщины изоляции с нижнего и верхнего торца секций (0,6 *мм*) получаем размер $40 + 1 + 0,5 + 0,6 = 42,1$ *мм*. Выбираем, с учетом нижней части изолятора под крышкой, высоту корпуса 54 *мм*, принятую для стандартных конденсаторов БГТ. Тогда объем корпуса конденсатора по его наружным размерам $45 \times 45 \times 54$ *мм* $= 108\,000$ *мм*^{3} =

$= 108$ *см*³. Эта цифра дает нам удельный объем конденсатора, поскольку его емкость равна 1 *мкф*:

$$c_{уд} = \frac{1}{108} = 0{,}00925 \text{ мкф/см}^3.$$

При 100° С не рекомендуется применять пайку мягким припоем. Берем поэтому стальной цельнотянутый корпус без швов (рис. 88, *а*) и штампованную крышку (рис. 88, *б*), которая соединяется с корпусом сваркой. Для изоляции выводов используем керамические изоляторы составного типа с уплотнением шайбами из специальной нагревостойкой резины.

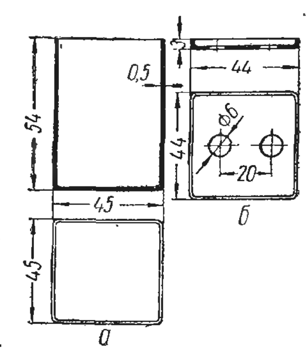


Рис. 88. Бумажный конденсатор герметизированного типа:

а — корпус; *б* — крышка.

Изолятор в собранном виде и его основные детали показаны на рис. 89. Вместо сборного можно использовать и более надежный в смысле герметизации керамический изолятор типа ИКПТ-0,6, соединенный с металлической арматурой переходным слоем стекла. Такой изолятор впаивается в крышку с помощью твердого припоя.

Схема намотки секции и ее габаритные размеры показаны на рис. 90, устройство выводного контакта — на рис. 91. В данном случае, ввиду высокой рабочей температуры и недостаточного сжатия сек-

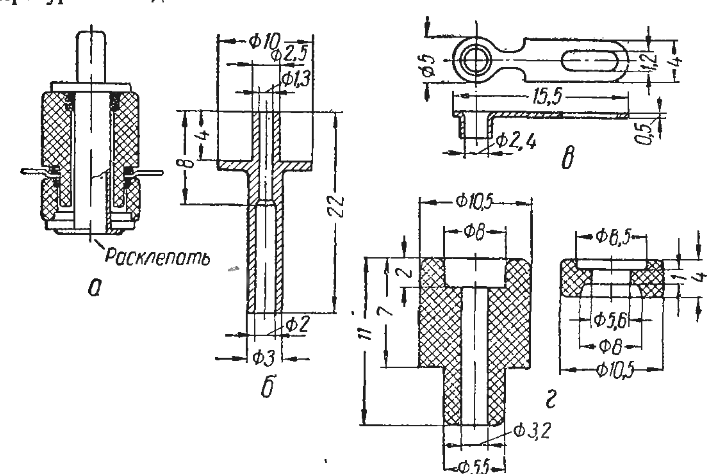


Рис. 89. Составной керамический изолятор:

а — собранный изолятор с уплотняющими прокладками; *б* — проходной вывод в виде трубки; *в* — контактный лепесток; *г* — керамические детали изолятора.

ции в корпусе (отсутствуют специальные обжимки), важно уделить особое внимание надежности контакта с обкладкой. Поэтому контак-

том служит полоска алюминиевой фольги относительно большой площади, конец которой обернут вокруг петли, скрученной из двойной медной луженой проволоки (две проволоки диаметром по 0,2 *мм*). При

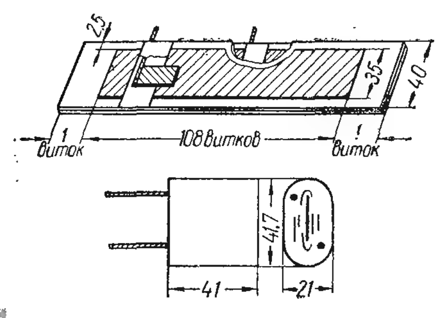


Рис. 90. Схема намотки и размеры секции конденсатора.

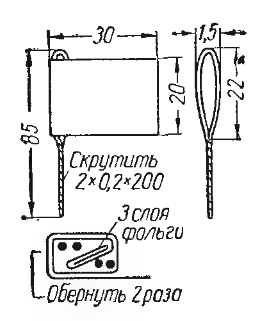


Рис. 91. Размеры и устройство выводного контакта секции.

Рис. 92. Устройство изоляции секций от корпуса.

Рис. 93. Общий вид бумажного конденсатора (600 *в*, 1 *мкф*, температура до 100° С).

вкладывании в секцию в процессе намотки часть контакта возле проволоки изолируется бумагой, как показано на рис. 91. Такой контакт можно заменить полоской медной луженой фольги, соединенной с обкладкой точечной сваркой. Эта система дает большую надежность контакта, но технологически сложнее.

Устройство «коробочки» (изоляция от корпуса), выполняемой из электрокартона марки ЭВ толщиной 0,3 *мм*, показано на рис. 92. Собранный конденсатор показан на рис. 93. Пространство над торцами секций под крышкой конденсатора заполняется прокладками из электрокартона.

Подсчитаем вес конденсатора. Вес обкладок $2 \cdot 5670 \cdot 7{,}5 \cdot 10^{-4} \times \times 2{,}7 = 2{,}3$ *г*. Вес бумаги $2 \cdot 1655 \cdot 4 \cdot 40 \cdot 10^{-4} \cdot 1{,}2 = 63{,}5$ *г*. Объем пор в бумаге $0{,}2 \cdot 64{,}5/1{,}2 = 10$ *см*³. Свободный объем корпуса конденсатора, заполняемый пропиточной массой (при отсутствии прокладок из электрокартона), примерно равен $4{,}5 \times 4{,}5 \times 1{,}0 = 20$ *см*³. Принимая удельный вес массы равным 1,0 *г/см*³ и ориентировочный объем 30 *см*³, получаем вес пропиточной массы в конденсаторе 30 *г*.

Исходя из размеров коробочки (рис. 92) и учитывая наличие добавочных прокладок, получаем вес электрокартона порядка 6 *г*. Вес корпуса и крышки (сталь, удельный вес 7,8 *г/см*³)

$$0{,}05\,(2 \cdot 4{,}4 \cdot 4{,}5 + 4 \cdot 4{,}5 \cdot 5{,}4)\,7{,}8 = 53{,}5 \text{ г}.$$

Принимая ориентировочно вес одного собранного изолятора 10 *г*, получаем вес изоляторов 20 *г*. Тогда примерный общий вес конденсатора составит $23 + 63{,}5 + 30 + 6 + 53{,}5 + 20 = 196$ *г*. Эта цифра характеризует и удельный вес конденсатора, поскольку его емкость 1 *мкф*. Отношение удельного веса к удельному объему $196/108 = 1{,}8$ *г/см*³ характерно для конденсаторов в металлическом корпусе и показывает, что вес подсчитан правильно.

§ 13. МЕТАЛЛОБУМАЖНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ НА НАПРЯЖЕНИЕ ДО 1500 *В*

В металлобумажных конденсаторах металлическая фольга заменена тонким слоем металла (тоньше 0,1 *мк*), нанесенным на бумагу, предварительно покрытую слоем этилцеллюлозного лака толщиной порядка 1 *мк*.

В связи с этим металлобумажный конденсатор обладает свойством самовосстановления при пробое и надежность его повышается по сравнению с бумажно-фольговым конденсатором, поэтому можно повысить величину $E_р$. Кроме того, появляется возможность применить вместо минимально допустимых двух слоев бумаги однослойный диэлектрик при относительно большом рабочем напряжении. Если учесть при этом резкое снижение толщины обкладки, которую практически можно не учитывать, подсчитывая размеры конденсатора, то легко объяснить резкое снижение удельного объема и веса металлобумажных конденсаторов по сравнению с обычными бумажно-фольговыми.

В конденсаторах типа МБГО (однослойных) один слой диэлектрика используется в диапазоне от 160 до 600 *в*.

Однако в производстве обычных металлобумажных конденсаторов при напряжениях выше 250 *в*, а иногда даже при 200 *в*, применяют добавочные прокладки из неметаллизированной и нелакированной бумаги, вследствие чего повышается постоянная времени конденсатора и его надежность при длительном хранении.

При металлизированных обкладках устраняется зазор между обкладкой и диэлектриком, что способствует повышению емкости; кроме того, несмотря на лакировку, поверхность бумаги остается не идеально гладкой. Тонкий металлический слой повторяет все неровности поверхности диэлектрика, что несколько увеличивает активную поверхность, а следовательно, и емкость. Вместе с тем слой лака имеющий $\varepsilon \approx 3$, т. е. ниже, чем у пропитанной бумаги, включаясь последовательно со слоем бумаги, несколько снижает емкость. Все же эффективная величина ε в однослойном металлобумажном конденсаторе несколько выше, чем в обычном бумажном конденсаторе, пропитанном неполярной массой. При использовании плотной конденсаторной бумаги КОН-2 для однослойного металлобумажного конденсатора при умеренном сжатии секции и пропитке церезином или вазелином можно принимать $\varepsilon = 4{,}5$. Для многослойных конденсаторов при пропитке вазелином величина $\varepsilon \approx 4$.

Таблица 23

Номинальные значения и допускаемая напряженность для металлобумажных однослойных конденсаторов типа МБГО

Номинальное напряжение, *в*	Толщина диэлектрика, *мк*	$E_р$, *кв/мм*
160	6 + 1 = 7	23,0
300	8 + 1 = 9	33,4
400—600	—	36,0

Таблица 24

Номинальные напряжения и допускаемая напряженность для металлобумажных многослойных конденсаторов типа МБГТ

Номинальное напряжение, *в*		Толщина диэлектрика, *мк*	$E_р$, *кв/мм*	
при 85° С	при 100° С		при 85° С	при 100° С
250	160	2×6+1=13	19,3	12,5
500	300	2×8+1=17	29,4	17,7
750	500	3×8+1=25	30,0	25,0
1000	750	3×10+1=31	32,3	24,2
1300	1000	4×10+1=41	31,8	24,4

Значения $E_р$ для однослойных конденсаторов типа МБГО для условий длительной работы при температуре не выше 60° С даны в табл. 23.

Значения $E_р$ для многослойных металлобумажных конденсаторов типа МБГТ, рассчитанных на работу при повышенных температурах, даны в табл. 24.

Величину закраин для металлобумажных конденсаторов принимают равной: при номинальном напряжении 160—400 *в* — 2 *мм*, при 600—1000 *в* — 3 *мм* и при 1500 *в* — 5 *мм*. Все эти данные относятся к работе при постоянном или пульсирующем напряжении, причем допускаемое значение переменной составляющей принимается таким же, как для конденсаторов бумажно-фольговых типа КБГ. Ввиду ухудшенной теплопроводности секций для обычных типов металлобумажных конденсаторов чистое переменное напряжение по амплитуде не должно быть выше предельных значений переменной составляющей при пульсирующем напряжении.

Для использования при переменном напряжении изготовляются специальные металлобумажные конденсаторы типа МБГЧ. В них для уменьшения потерь и улучшения распределения поля в диэлектрике применяется нелакированная бумага. При двух слоях бумаги по 8 *мк* допускаемое напряжение (эффективное) при частоте 50 *гц* равно 250 *в* ($E_р$ = 15,6 *кв/мм*). При больших напряжениях такие секции включаются последовательно с таким расчетом, чтобы на секцию приходилось напряжение не выше 250 *в*; этим предотвращается развитие ионизации. При частоте 100 *гц* допускается 75% $U_н$, соответствующего частоте 50 *гц*, а при 500 *гц* — 50% $U_н$. Емкость конденсаторов типа МБГЧ — не выше 10 *мкф* при 250 *в* и не выше 1 *мкф* при 1000 *в*, что ограничивает размеры конденсатора во избежание опасного внутреннего перегрева.

Пример. Рассчитать однослойный металлобумажный конденсатор емкостью 20 *мкф* при номинальном рабочем напряжении 160 *в* и температуре до 60° С. Конструкция герметизированная, с применением пайки мягким припоем и со стеклянными изоляторами.

Согласно табл. 23 принимаем толщину лакированной бумаги 7 *мк*. Величина закраин при напряжении 160 *в* составляет 2 *мм*. Принимаем $\varepsilon = 4{,}5$, ширину бумаги 37 *мм*. Активная ширина обкладок

$$b_а = 37 - 2 \cdot 2 = 33 \text{ мм}.$$

Разбив конденсатор на 4 параллельно соединяемые секции, выбираем диаметр намоточной оправки 25 *мм*. Подсчитаем число витков по формуле (1-56) с учетом того, что при намотке металлобумажных конденсаторов принимается увеличенное число холостых витков в начале и конце намотки, обычно 5—10.

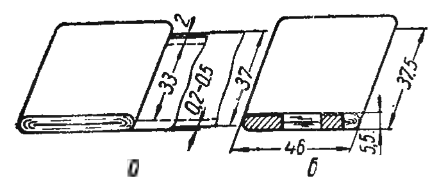


Рис. 94. Секции металлобумажного конденсатора:

а — до контактирования; *б* — после контактирования (напыления металла на торцы).

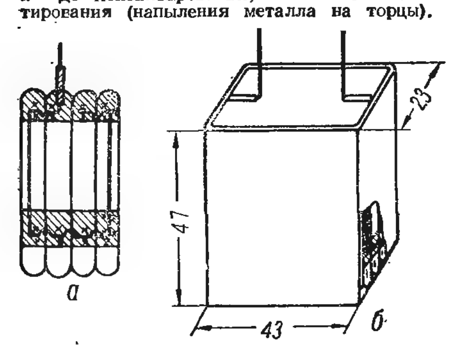


Рис. 95. Металлобумажный конденсатор:

а — схема соединення секций; *б* — изолированный пакет секций перед сборкой в корпус.

Взяв 5 холостых витков в начале намотки, получим диаметр, при котором начнется иамотка активных витков,

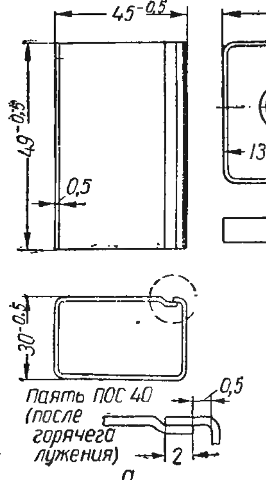
$$25 + 2 \cdot 5 \cdot 0{,}007 = 25{,}07 \text{ мм}.$$

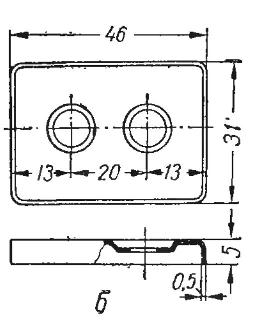
Приняв толщину обкладки равной иулю, вычислим коэффициент

$$K_и = \frac{0{,}144 \cdot 7 \cdot 7}{4{,}5 \cdot 3{,}3} = \frac{7{,}05}{14{,}8} = 0{,}477.$$

Выражение $K_н C_с = 0{,}477 \cdot 5 = 2{,}39$. Диаметр секции на оправке до намотки последних холостых витков

$$D = \sqrt{2{,}507^2 + 2{,}39} = 2{,}95 \text{ см}.$$





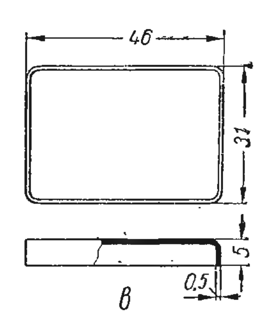


Рис. 96. Металлобумажный конденсатор:

а — корпус; *б* — крышка; *в* — дно.

Число активных витков

$$w = \frac{2,5 \cdot 10^3 (2,95 - 2,507)}{7} = \frac{1100}{7} = 160.$$

Полное число витков равно $160 + 10 = 170$.

Толщина секции

$$\Delta_c = 7 \cdot 170 \cdot 7 \cdot 10^{-4} = 0,475 \textit{ см} = 4,75 \textit{ мм}.$$

Ширина секции согласно формуле (3-22)

$$a_c = \frac{\pi \cdot 2,5}{2} + 1,2 \cdot 0,475 = = 4,49 \textit{ см} \approx 45 \textit{ мм}.$$

Секция показана на рис. 94. Металлизированные ленты сдвигаются на 0,2 — 0,5 *мм* для облегчения контактирования, которое в производстве металлобумажных конденсаторов осуществляется напылением (шоопированием) на торцы секций слоя сплава ПОС-40 толщиной 0,4—0,7 *мм*. Расположение этого слоя (контактных накладок) показано на рис. 94. Схема параллельного соединения секций показана на рис. 95, *а*; собранный пакет секций, изолированный конденсаторной бумагой, с общей толщиной 0,03 *мм* показан на рис. 95, *б*. Исходя из размеров пакета, выбираем корпус типа МБГО: основание 46 × 31 *мм*, высота 50 *мм*. При этом объем корпуса конденсатора равен 4,6 × 3,1 × × 5 = 71 *см*³ и удельный объем соответственно 71/20 = 3,55 *см*³/*мкф*.

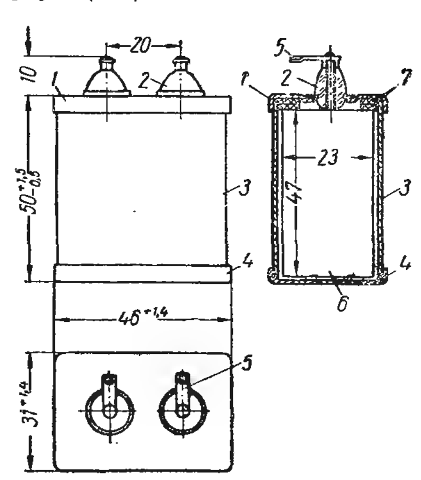


Рис. 97. Общий вид металлобумажного конденсатора МБГО ($U = 60$ *в*, $C = 20$ *мкф*):

1 — крышка; 2 — изолятор; 3 — корпус; 4 — дно; 5 — лепесток; 6 — пакет секций; 7 — изоляционные прокладки.

Корпус конденсатора с пайкой шва внахлест показан на рис. 96, *а*, а крышка и дно, изготовленные штамповкой,— на рис. 96, *б* и *в*. Собранный конденсатор показан на рис. 97. В крышку впаяны стеклянные проходные изоляторы. Вес конденсатора подсчитывается аналогично бумажным конденсаторам.

Расчет напряжения теплового пробоя металлобумажного конденсатора рассмотрен в § 2.

§ 14. БУМАЖНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ НА НАПРЯЖЕНИЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА 1600 *В* И ВЫШЕ

Бумажные высоковольтные конденсаторы широко применяются в радиотехнических устройствах, в конденсаторных делителях высоких и сверхвысоких напряжений, генераторах импульсных напряжений и токов, фильтровых подстанций электрических железных дорог и в других отраслях народного хозяйства.

Конденсаторы этого типа охватывают широкий диапазон рабочих напряжений (до сотен киловольт) и емкостей (от сотен пикофарад до десятков микрофарад) и в зависимости от конструкции и типа пропиточного состава могут быть использованы в широком диапазоне рабочих температур.

Стремление повысить напряжение начала ионизации и электрическую прочность, в особенности у конденсаторов, предназначенных для работы в области низких температур, привело к тому, что для пропитки высоковольтных конденсаторов применяют жидкие пропитывающие составы, нефтяные масла, октол, касторовое масло, кремнийорганические жидкости. Лишь в отдельных случаях для конденсаторов, рассчитанных на относительно невысокое рабочее напряжение, допустимо применять полужидкую пропитывающую массу — конденсаторный вазелин. При этом нужно учитывать значительную усадку конденсаторного вазелина при его застывании, вследствие чего снижается электрическая прочность конденсаторов при отрицательной температуре.

Качество и работоспособность высоковольтных бумажных конденсаторов зависит, в первую очередь, от правильного выбора конструкции, основных материалов и технологического процесса изготовления.

Выбор диэлектрика конденсатора

Значение ε и допустимой напряженности поля $E_р$ пропитанного бумажного диэлектрика определяется в основном видом конденсаторной бумаги и пропиточным составом. Широко применяемые в настоящее время пропитывающие составы можно разделить на две основные группы: неполярные — нефтяные масла (конденсаторное масло, медицинское вазелиновое масло) и октол и полярные — касторовое масло.

Неполярные пропитывающие составы применяются в том случае, если от конденсатора необходимо получить высокие значения электрических характеристик (высокое $R_{из}$ и малый $\operatorname{tg}\delta$) и малое отклонение емкости при крайних значениях рабочих температур. Наименее теплостойким из этих пропиточных составов является конденсаторное масло, поэтому его следует использовать для конденсаторов с рабочей температурой не выше 70° С.

Медицинское вазелиновое масло имеет лучшие электрические характеристики при повышенных температурах, чем конденсаторное масло, и более высокую теплостойкость, в связи с чем оно применяется для пропитки конденсаторов, работающих при температурах до 100° С.

Для пропитки конденсаторов, рассчитанных на работу при повышенных температурах (85 ÷ 125° С), наиболее целесообразно использовать синтетическое масло — октол, предварительно очищенный адсорбентами для получения высоких электрических характеристик при повышенных температурах.

Применяя для пропитки бумажных конденсаторов полярные диэлектрики, можно снизить габаритные размеры конденсаторов и, следовательно, сэкономить активные материалы. Так, применяя касторовое масло, можно снизить размеры конденсаторов по сравнению с конденсаторами, пропитанными неполярными пропитывающими массами, примерно на 30% за счет более высокой ε и на 25—30% за счет применения более высокого рабочего градиента напряженности поля.

Однако следует иметь в виду, что касторовое масло имеет относительно низкое удельное объемное сопротивление и повышенный угол потерь. Поэтому применять его следует для конденсаторов с рабочей температурой не выше 70° С. Вторым существенным недостатком касторового масла является то обстоятельство, что пропитанные им конденсаторы снижают емкость при температуре —60° С на 15—20% от емкости, измеренной при температуре 20° С. Поэтому нижним пределом рабочей температуры для этих конденсаторов следует считать температуру —40° С, при которой емкость конденсаторов мало изменяется в сравнении с ее значением при комнатной температуре.

Кратковременная электрическая прочность пропитанной конденсаторной бумаги зависит в основном от плотности бумаги, числа листов между обкладками, общей толщины

диэлектрика между обкладками, качества сушки и пропитки.

Значения электрической прочности бумажного диэлектрика, пропитанного маслом, при емкости конденсаторов порядка 0,1 *мкф* приведены на рис. 81.

Однако кратковременной электрической прочностью нельзя правильно охарактеризовать диэлектрик конденсатора с точки зрения устойчивости его к длительному воздействию напряжения. Поэтому выбор рабочей напряженности диэлектрика является одним из решающих факторов, определяющих работоспособность конденсатора. Допускаемые значения рабочих напряженностей электрического поля приведены в табл. 25.

Таблица 25

Рабочая напряженность конденсаторной бумаги, пропитанной различными составами

Режим работы	Пропитывающий состав	$E_р$, *кв/мм*
Постоянное напряжение, $t_{р.\ макс} = 70°$ С, срок службы порядка 5000 *ч*	Минеральное масло	35—40
То же	Касторовое масло	45—50
Постоянное напряжение, $t_р = 70 \div 125°$ С, срок службы порядка 5000 *ч*	Октол	35—40
Постоянное напряжение, $t_р < 70°$ С, кратковременный срок службы	Касторовое, минеральные масла	70—100
Постоянное напряжение, $t_р < 70°$ С, длительный срок службы в необслуживаемых объектах (10—20 лет непрерывной работы)	Конденсаторный вазелин	20—30

Выбор конструктивного оформления конденсатора

При конструктивном оформлении конденсатора прежде всего следует рассмотреть вопрос о конструкции секции и пакета секций.

Цилиндрические секции применяются главным образом для изготовления малосекционных конденсаторов относительно низкого напряжения и малой емкости. Конденсаторы высокого напряжения и большой емкости обычно собираются из плоскопрессованных секций, соединяемых параллельно, последовательно или последовательно-параллельно.

В результате различного натяжения лент бумаги в процессе намотки таких секций и их упругости между лентами бумаги и фольги остается некоторое пространство, которое

при пропитке заполняется маслом. Величина этого пространства может изменяться в зависимости от степени сжатия или запрессовки пакета секций. Меняя, таким образом, соотношение между количеством свободного масла, находящегося между листами бумаги, и количеством клетчатки в 1 *см*³, можно получить различные значения ε и tgδ, коэффициента теплопроводности, сопротивления изоляции и других характеристик конденсатора.

Степень сжатия секции на практике определяется величиной коэффициента запрессовки $k_п$ [см. формулу (3-4)]. При изменении коэффициента запрессовки от 0,85 до 0,95 емкость секций увеличивается на 18—20%, вследствие чего можно существенно сократить расход дорогостоящих активных материалов. Кроме того, секции с повышенным коэффициентом запрессовки обычно дают более высокие значения электрической прочности, так как в них меньше толщина зазоров, заполняемых пропиточной массой, что затрудняет развитие пробоя. При изготовлении многосекционных конденсаторов с плоскими секциями можно значительно лучше использовать объем прямоугольного корпуса и, следовательно, заметно снизить объем готового конденсатора.

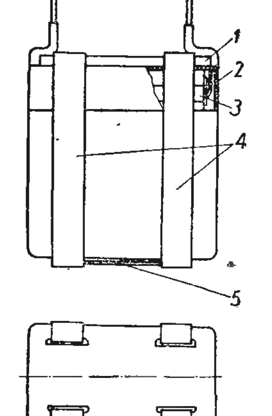


Рис. 98. Пакет секций плоскопрессованного типа с металлической и изоляционной щеками:

1 — верхняя щека из текстолита или гетинакса; *2* — изоляция от корпуса; *3* — секция; *4* — стальные стяжки; *5* — нижняя, стальная, щека.

Для сохранения плоской формы секций в процессе изготовления и эксплуатации конденсаторов большого размера применяют обжимки, в которых сразу зажимают весь пакет секций, образующих конденсатор. Для этой цели могут быть использованы стальные или изоляционные (гетинакс, текстолит) обжимные щеки, изолированные от пакета секций несколькими листами кабельной бумаги и стянутые стальными бандажами (рис. 98). Для стяжки пакетов секций конденсаторов высокого напряжения применяются изоляционные планки из гетинакса или текстолита, скрепляющие металлические обжимные пластины. Герметизация пакета конденсатора достигается различными способами,

зависящими в основном от условий эксплуатации конденсатора.

В конденсаторах, предназначенных для длительной работы в условиях повышенной влажности, используются цилиндрические или прямоугольные стальные корпуса. Для конденсаторов относительно небольшого габарита применяются корпуса, полученные методом глубокой вытяжки с паяной или сварной крышкой. Для крупногабаритных конденсаторов используются корпуса, изготовленные с использованием пайки мягкими припоями или сварки.

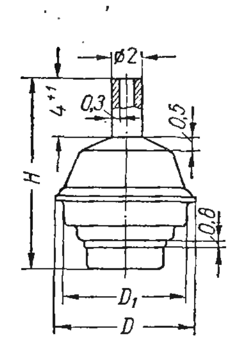


Рис. 99. Внешний вид и габаритные размеры изоляторов типа ИКПТ (0,6—5 *кв*).

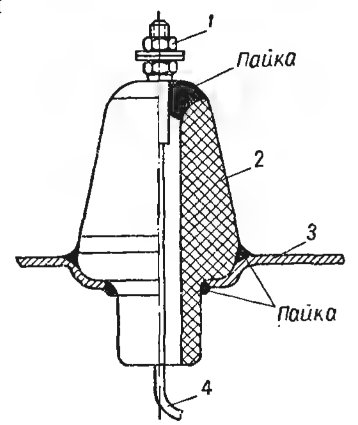


Рис. 100. Монтированный изолятор ИКПТ-16:

1 — арматура; 2 — изолятор; 3 — крышка конденсатора; 4 — токоведущий провод.

Герметизация с использованием пайки мягкими припоями используется обычно для конденсаторов, рассчитанных на работу при максимальной температуре не выше 70° С. Для герметизации конденсаторов с рабочей температурой свыше 70° С используется, как правило, сварка.

Вывод от пакета секций осуществляется с помощью того или иного типа керамических изоляторов, впаянных или сваренных с крышкой конденсатора.

Изоляторы типа ИКПТ (рис. 99, 100, табл. 26) рассчитаны на напряжения от 0,6 до 50 *кв* и отличаются малыми размерами; хвостовик у изоляторов на напряжение ниже 5 *кв* отсутствует. В связи с этим необходима тщательная обработка конструкции изоляции вывода, идущего от пакета к изолятору. Обычно для этой цели используется пропитан-

ная кабельная бумага. Изолятор типа ИКПТ соединяется с корпусом конденсатора приваркой или пайкой твердым припоем. Изоляторы типа ИКП (рис. 101) рассчитаны на напряжения от 2 до 30 *кв* и герметизацию пайкой мягкими припоями.

Если от конденсатора не требуется вакуумплотной герметизации, корпус изготовляется из пластмассы. Для прямоугольных корпусов может быть использован винипласт или сополимер стирола с нитрилакрилом (СНП). В этом случае корпуса можно сваривать горячим воздухом с присадкой из свариваемого материала. Пластмасса СНП, кроме того, хорошо склеивается дихлорэтаном или 5—10%-ным раствором СНП в дихлорэтане.

Рис. 101. Монтированный изолятор ИКП-8:
1 — шпилька М8; 2 — верхний коваровый колпачок; 3 — изолятор; 4 — нижний коваровый колпачок; 5 — крышка конденсатора; 6 — изоляция токоведущего провода; 7 — токоведущий провод.

Пример. Рассчитать конденсатор емкостью 0,025 *мкф* на рабочее напряжение 100 *кв* постоянного тока, предназначенный для длительной работы (не менее 5000 *ч*) в диапазоне температур от — 10 до 60° С в среде с относительной влажностью, не превышающей 80%. Габаритные размеры и вес конденсатора должны быть минимальными.

С целью уменьшения габарита и веса конденсатора применяем в качестве основного диэлектрика конденсаторную бумагу повышенной плотности (КОН-2), пропитанную полярной жидкостью — касторовым маслом. Это возможно

Таблица 26

Основные размеры изоляторов типа ИКПТ

Рабочее напряжение, *кв*	Вид изоляторов	Размеры, *мм*				Вес, *г*
		$D_{макс}$	D_1		$H_{макс}$	
			Номинальный	Допустимые отклонения		
0,6	ИКПТ-0,6	8,7	7,2	±0,2	11	10
1,0	ИКПТ-1	10,7	9,4	±0,2	15	15
2,0	ИКПТ-2	10,7	9,4	±0,2	21	25
5,0	ИКПТ-5	10,7	9,4	±0,2	26	30
30,0	ИКПТ-30а	38,5	22,0	—0,15	70	70
40,0	ИКПТ-40а	32,5	15,0	—0,12	96	120
50,0	ИКПТ-50а	38,5	22,0	—0,14	100	160

в связи с тем, что конденсатор предназначается для работы в относительно узком интервале температур.

В соответствии с табл. 25 принимаем $E_р = 50$ *кв/мм*. Предполагаем, что пакет конденсатора набирается из плоскопрессованных секций, т. е. подвергается прессовке. Примем пакет конденсатора состоящим из 20 последовательно включенных секций, намотанных из бумаги толщиной 10 *мк*. Тогда толщина диэлектрика секции конденсатора

$$d_б = \frac{100}{20 \cdot 50} = 0{,}1 \textit{ мм} = 100 \textit{ мк},$$

т. е. необходимо взять для намотки секций 10 слоев конденсаторной бумаги толщиной 10 *мк*. Принимаем ширину бумаги равной 180 *мм*. Предполагаем, что намотка секций осуществляется с ленточными выводами из отожженной медной фольги толщиной 30 *мк*, покрытой гальваническим слоем олова. Принимаем ширину закраины равной 15 *мм*. Берем алюминиевую фольгу шириной $b = 180 - 2 \cdot 15 = 150$ *мм* и толщиной 7,5 *мк*. Принимаем диаметр намоточной оправки $D_о = 70$ *мм*. Емкость одной секции $C_с = 0{,}025 \cdot 20 = 0{,}5$ *мкф*.

Количество витков секции подсчитаем по формуле, полученной преобразованием формулы (1-53),

$$w = \frac{D_о \cdot 10^4}{4(d_б + d_о)}\left(\sqrt{\frac{0{,}144\, C_с n d_б (n d_б + d_о)}{\varepsilon b_а D_о^2} + 1} - 1\right), \qquad (3\text{-}23)$$

где $nd_б$ — толщина диэлектрика между обкладками, *мк* (n — число слоев бумаги);

$d_о$ — толщина фольги, *мк*;

ε — диэлектрическая проницаемость пропитанной бумаги;

$b_а$ — активная ширина фольги, *см*;

$D_о$ — диаметр намоточной оправки, *см*;

$$w = \frac{7 \cdot 10^4}{4(100 + 7{,}5)}\left(\sqrt{\frac{0{,}144 \cdot 0{,}5 \cdot 100\,(100 + 7{,}5)}{4{,}9 \cdot 15 \cdot 4{,}9^2} + 1} - 1\right) = 16{,}3.$$

Принимаем число витков секции равным 16.

Определим размеры секции.

Толщина секции $\Delta = 4w(nd_б + d_о)\,10^{-3} = 4 \cdot 16 \cdot (100 + 7{,}5) \cdot 10^{-3} = 6{,}9$ *мм*. Принимаем толщину секции равной 7 *мм*.

Ширина секции $a_с = \frac{\pi D_о}{2} + \Delta + (1 \div 3)$ *мм* $= \frac{3{,}14 \cdot 70}{2} + 7 + (1 \div 3) = 116{,}9 + (1 \div 3)$. Принимаем ширину секции равной 119 *мм*.

Размеры секции (с учетом разбега бумаги при намотке) 180 *мм* × 119 *мм* × 7 *мм*.

Для изоляции между секциями применяем прокладки из 6 слоев кабельной бумаги толщиной 0,12 *мм*. Для сжатия пакета применяем текстолитовые платы толщиной 8 *мм* и боковые стеклотекстолитовые щеки, соединяемые с платами металлическими стяжками.

Спрессованный пакет секций, пропитанный предварительно касторовым маслом, помещаем в изоляционный корпус и заливаем касторовым маслом при температуре порядка 50° С и остаточном давлении 0,2—0,5 *мм рт. ст.* В качестве материала для корпуса применяем сополимер стирола с нитролом акриловой кислоты (СНП). Для уплотнения выводов конденсатора применяем тепло- и маслостойкую резину марки 9024. Чертеж конденсатора приведен на рис. 102.

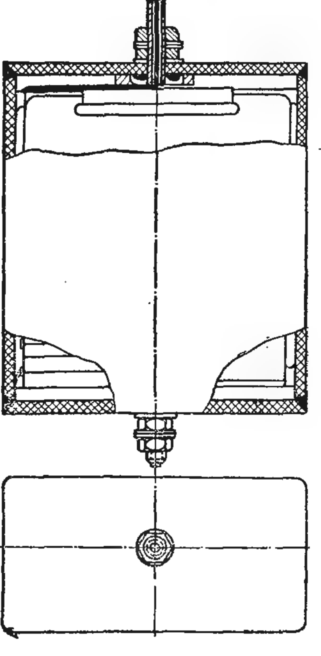


Рис. 102. Конденсатор на рабочее напряжение 100 *кв*, емкостью 0,025 *мкф*.

§ 15. КОНДЕНСАТОРЫ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПРИ ЧАСТОТЕ 50 *ГЦ*

Конденсаторы с диэлектриком из пропитанной маслом или хлордифенилом (соволом) бумаги широко применяются для улучшения коэффициента мощности электрических установок, работающих при частоте 50 *гц*. Эти конденсаторы получили название косинусных.

Считается экономически оправданным, если мощность конденсаторных установок в энергосистеме составляет 20—30% установленной мощности ее генераторов. Конструкция конденсатора должна обеспечивать возможность массового выпуска в условиях автоматизированного и механизированного производства, обладать высокими технико-экономическими показателями и надежностью работы.

В соответствии с назначением основным параметром косинусного конденсатора является величина реактивной мощности

$$P_{\text{р}} = UI \sin \varphi. \tag{3-24}$$

Если U в киловольтах, I в амперах, то реактивная мощность выражается в киловольтамперах реактивных (*квар*).

В правильно сконструированных конденсаторах потери малы, угол φ близок к 90°, $\sin\varphi \approx 1$, а

$$P_р \approx UI = U^2 \omega C \cdot 10^{-3} квар, \quad (3\text{-}25)$$

где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота;

C — емкость конденсатора, *мкф*.

Как правило, косинусные конденсаторы включаются в трехфазную сеть. Можно включать три однофазных конденсатора по схеме звезды или треугольника или один конденсатор, состоящий из трех однофазных секций, собранных в одном баке.

В обоих случаях реактивная мощность вычисляется по формуле

$$P_р = 3U^2 \omega C \cdot 10^{-3} квар, \quad (3\text{-}26)$$

где U — напряжение линейное для треугольника или фазное для звезды, приходящееся на однофазный конденсатор или на секцию трехфазного конденсатора, *кв*;

C — емкость однофазного конденсатора или однофазной секции, *мкф*.

При включении звездой суммарная реактивная мощность трех конденсаторов одинаковой емкости будет в три раза меньше, чем при включении треугольником, так как напряжение одного конденсатора при включении звездой в $\sqrt{3}$ раз меньше напряжения одного конденсатора при включении треугольником.

Вторым параметром косинусного конденсатора является рабочее напряжение, определяемое напряжением потребителя или сети, к которым присоединяются конденсаторы. В настоящее время стандартом установлены следующие номинальные напряжения косинусных конденсаторов: 220, 380, 500, 1050, 6300 и 10 500 *в*.

В электрических сетях, в особенности на передающих концах сети, допускаются напряжения выше номинального, поэтому конструкция конденсатора рассчитывается для длительной работы при напряжении, равном 1,1 $U_н$, в соответствии с этим в 1,21 раз повышается реактивная мощность конденсатора.

Для облегчения массового производства косинусных конденсаторов и упрощения монтажа конденсаторных батарей необходимо, чтобы конденсаторы выпускались ограниченных габаритных размеров, причем в пределах каждого

габаритного размера должны быть конденсаторы различной емкости, рассчитанные на работу при разных номинальных напряжениях.

В табл. 27 приведены основные данные одного из вариантов серии бумажно-масляных и бумажно-соволовых конденсаторов.

На номинальное напряжение 220, 380 и 500 *в* конденсаторы выпускаются в трехфазном исполнении и имеют три секции, соединенные в треугольник. В таблице указана суммарная емкость всех трех фаз. Конденсаторы на напряжения 1,05; 3,15; 6,3; 10,5 *кв* выпускаются в однофазном исполнении с двумя выводами, изолированными от корпуса, что позволяет включать эти конденсаторы как звездой, так и треугольником.

Из табл. 27 следует, что конденсаторы при напряжении 220 *в* при одних и тех же габаритных размерах выполняются с мощностью в 2,5 раза меньшей, чем конденсаторы на более высокие напряжения. В соответствии с этим конденсаторы с $U_н =$ $= 220$ *в* имеют резко

Таблица 27

Основные данные бумажно-масляных и бумажно-соволовых конденсаторов для частоты 50 *гц*

Пропитка	Габаритный размер	Размеры, *мм*		Вес, *кг*	Рабочее напряжение, *в*	Номинальная мощность, *квар*	Удельные характеристики	
		Основание	Высота без изолятора				*кг/квар*	*дм³/квар*
Масляная	I	380×110	370	23	220 380—10 500	4 10	5,75 2,3	3,88 1,55
	II	318×145	860	65	220 380—10 500	10 25	6,5 2,6—2,96	3,96 1,58—1,8
Соволовая	I	370×130	365	33	220 380—6300	7,6 25,5—20	4,34 2,13—1,65	2,32 1,13—0,85
	II	309×131	850	68,5	220 380—6300	15,8 28—29	4,34 2,44—1,89	2,17 1,23—1,0

ухудшенные удельные характеристики. Трудоемкость изготовления этих конденсаторов, рассчитанная на 1 *квар*, также значительно выше, чем у конденсаторов на более высокие напряжения.

Причина ухудшенных характеристик конденсаторов на 220 *в* объясняется тем, что конденсаторную бумагу при значительной площади обкладок нельзя применять в одном слое из-за наличия в ней проводящих частиц, закорачивающих один слой.

В связи с этим для перекрытия ослабленных мест приходится брать два-три слоя бумаги между обкладками, и рабочая напряженность диэлектрика конденсаторов на 220 *в* оказывается сниженной по сравнению с конденсаторами на более высокие напряжения, а это в соответствии с формулой (1-193) приводит к увеличению объема активного диэлектрика и повышению удельных значений веса и объема низковольтного конденсатора.

Кроме конденсаторов I и II габаритных размеров (табл. 27) разработана серия конденсаторов III габаритного размера на ту же шкалу напряжения с размерами корпуса $625 \times 140 \times 850$ *мм*, мощностью 16,6 *квар* для конденсаторов с $U_н = 220$ *в* и 50 *квар* для напряжений 380—6300 *в*. Проектируется также серия конденсаторов IV габаритного размера с мощностью 100 *квар* для напряжений 380—6300 *в* и 33,3 *квар* для $U_н = 220$ *в*.

В практике силового конденсаторостроения имеются примеры изготовления конденсаторов с еще более высокой мощностью в одном баке. Так, например, в Японии выпускаются косинусные конденсаторы мощностью 300 *квар* для напряжения 3300—6000 *в* и мощностью 834 *квар* для напряжения 11 и 22 *кв*.

С ростом мощности единичного конденсатора увеличивается удельный расход неактивных материалов, вследствие необходимости увеличивать толщину стенок бака, сечение токоведущих частей, размеры каркасов для крепления секций. В крупных конденсаторах необходимо предусматривать устройство специальных расширителей для компенсации температурного расширения масла (в конденсаторах меньших размеров эта компенсация достигается за счет упругих деформаций стенок корпуса).

Конденсаторы больших размеров имеют ухудшенные тепловые характеристики; при одинаковых условиях максимальная температура диэлектрика у них выше, чем у кон-

денсаторов с меньшими габаритными размерами. Надежность работы крупных конденсаторов, как правило, ниже надежности работы конденсаторов малой и средней мощности. Конденсаторы малой мощности проще в изготовлении и удобнее для их монтажа и транспортировки, хотя общая трудоемкость монтажа и время, затрачиваемое на эксплуатационный надзор, меньше при комплектовании батарей из единиц большой мощности. Учет всех этих обстоятельств определил тенденцию в современной мировой практике строить основное количество конденсаторов малой и средней мощности (не свыше 100 *квар*).

Требования и исходные данные для расчета косинусных конденсаторов

Косинусные конденсаторы изготовляют для внутренней и наружной установки.

ГОСТ 1282—58 «Конденсаторы для повышения коэффициента мощности установок переменного тока частотой 50 *гц*» допускает для косинусных конденсаторов наивысшую температуру окружающего воздуха 35° С при продолжительном режиме работы на высоте до 1000 *м* над уровнем моря, а также при естественно изменяющейся температуре окружающего воздуха, эпизодически достигающей 40° С. Нижний предел окружающей температуры в ГОСТ не предусмотрен, но в программе испытаний конденсаторов наружной установки указано, что емкость и тангенс угла диэлектрических потерь не должны выходить из установленных пределов при температуре —45° С.

Для обеспечения надежной работы конструкция конденсатора должна быть герметична, следовательно, необходимо учитывать тепловое расширение масла, а в конденсаторах больших габаритных размеров создавать специальные устройства для компенсации этого расширения.

У косинусных конденсаторов допускается отклонение от номинальной величины емкости в пределах от —5 до +15%, что должно быть учтено при определении максимального значения мощности конденсатора.

Косинусные конденсаторы рассчитываются на продолжительную непрерывную работу, что вызвано их включением в непрерывно работающую электрическую сеть.

Для электрического расчета конденсатора необходимо знать величину испытательного напряжения. По ГОСТ

1282—58 конденсатор должен выдержать в течение одной минуты между выводами $U_{исп} = 2,2\ U_н$ при $f = 50$ *гц* или $U_{исп} = 4,3\ U_н$ при постоянном напряжении. Одноминутные испытательные напряжения при частоте $f = 50$ *гц* для изоляции относительно корпуса приведены в табл. 28.

Таблица 28

Номинальные и испытательные напряжения конденсаторов

$U_н$, *в*	220	380	500	1050	3150	6300	10 500
$U_{исп}$, *в*	2500	2500	2500	5000	18 000	25 000	35 000
$\frac{U_{исп}}{U_н}$	11,3	6,6	5,0	4,76	5,7	4,0	3,33

Таблица 29

Номинальные и испытательные мокроразрядные напряжения изоляторов

$U_и$, *в*	3150	6300	10 500
$U_{исп}$, *в*	20 000	28 000	34 000
$\frac{U_{исп}}{U_н}$	6,35	4,45	3,24

Из табл. 28 следует, что с увеличением номинального напряжения кратность испытательного напряжения снижается. Это определяется в первую очередь экономическими соображениями: с ростом номинальных напряжений резко увеличивается объем и стоимость изоляционных материалов.

Изоляторы конденсаторов наружной установки должны выдерживать мокроразрядные напряжения, указанные в табл. 29.

Исходными данными для расчета конденсатора являются: номинальная мощность; число фаз в конденсаторе; рабочая частота; номинальное напряжение; испытательное напряжение между выводами; максимальная температура окружающего воздуха.

По первым четырем данным вычисляется емкость конденсатора. После этого выбирают активные материалы (сорт и толщина бумаги, пропитывающий состав, сорт и толщина фольги), а затем приступают к определению размеров активной части конденсатора.

Выбор сорта бумаги и пропитывающей массы

Основным диэлектриком для косинусных конденсаторов в настоящее время является конденсаторная бумага.

Для изготовления силовых конденсаторов с пропиткой маслом применяется бумага нормальной плотности (объемный вес 1,0 *г/см*³) — марки КОН-1, обладающая меньшими потерями, чем бумага КОН-2 со средним объемным весом 1,2 *г/см*³. Для силовых конденсаторов, пропитываемых хлорированными массами, например соволом, осваивается выпуск нового типа бумаги с пониженными диэлектрическими потерями и с объемным весом 0,8 *г/см*³.

Бумага выпускается различной толщины, поэтому одну и ту же толщину диэлектрика в конденсаторе можно получить при различном числе слоев бумаги. При решении этой задачи путем расчета нескольких вариантов следует учитывать такие факторы:

при одной и той же толщине диэлектрика с увеличением числа слоев растет электрическая прочность (см. рис. 81);

стоимость одного килограмма бумаги возрастает с уменьшением ее толщины (см. табл. 15);

намотка секции из меньшего числа слоев несколько уменьшает трудоемкость процесса намотки, но только на хорошо отрегулированных станках. Число обрывов бумаги при намотке возрастает при уменьшении ее толщины.

Толщина в 120 *мк*, которая соответствует максимальной электрической прочности (см. кривую *3*, рис. 81), может быть получена из 8 слоев бумаги толщиной 15 *мк*, из 12 слоев бумаги толщиной 10 *мк* и т. д. При одинаковой площади электродов емкость секций, выполненных из бумаги различной толщины, будет практически одинакова.

Одинаковой будет и рабочая напряженность электрического поля в диэлектрике, но с уменьшением толщины одного слоя и увеличением их числа будет возрастать запас электрической прочности конденсатора и одновременно стоимость бумаги. При переходе от бумаги толщиной 12 *мк* к бумаге толщиной 8 *мк* кратковременная электрическая

прочность по данным рис. 81 при постоянном напряжении возрастает с 290 *кв/мм* до 360 *кв/мм*, т. е. на 24%, а стоимость бумаги возрастает более чем в 2 раза (см. табл. 15).

Если сохранить одно и то же значение коэффициента запаса по электрической прочности и уменьшить толщину диэлектрика, собранного из более тонкой бумаги, то соотношение стоимостей изменится в лучшую сторону. Для секции, намотанной из бумаги толщиной 8 *мк*, электрическая прочность 290 *кв/мм* (прочность десяти слоев бумаги толщиной 12 *мк*) соответствует общей толщине 30 *мк*, т. е. секция может быть выполнена с диэлектриком из 4 слоев бумаги толщиной 8 *мк*. Стоимость бумаги в одной секции, намотанной из восьмимикронной бумаги, уменьшится в 4 раза и будет такой же, как и для секции, намотанной из бумаги толщиной 12 *мк*.

При уменьшении толщины диэлектрика увеличивается почти в четыре раза емкость отдельной секции и уменьшается число параллельных секций в конденсаторе, что в свою очередь еще в 4 раза снижает стоимость бумаги, затрачиваемой на весь конденсатор.

Из этого примера видно, что при расчете конденсатора должно быть рассмотрено несколько вариантов выполнения секций из бумаги различной толщины и после определения объема активного диэлектрика должна быть подсчитана стоимость бумаги и выбран наиболее экономичный вариант.

В настоящее время наиболее распространенными пропитывающими составами для косинусных конденсаторов являются минеральное конденсаторное масло (ГОСТ 5775—51) и хлорированные дифенилы (совол в СССР, аскарель в США, клофен в ФРГ, пирален во Франции).

Конденсаторное масло благодаря своим достаточно хорошим электрическим характеристикам, доступности сырья и сравнительно низкой стоимости являлось ранее наиболее распространенным пропиточным составом для косинусных конденсаторов.

Основным недостатком конденсаторного масла является сравнительно низкое значение диэлектрической проницаемости, что снижает удельную емкость конденсатора, а также низкая газостойкость (малая устойчивость к действию переменного электрического поля).

При возникновении в диэлектрике конденсатора ионизационных разрядов масло легко разлагается с выделением газообразных продуктов, в основном водорода; это облегчает

дальнейшее развитие ионизационных процессов и ведет к постепенному разрушению изоляции и сокращению срока службы конденсатора.

Основными преимуществами хлорированных дифенилов, в частности совола, являются повышенное по сравнению с маслом значение диэлектрической проницаемости и резко улучшенная стабильность при воздействии переменного электрического поля. Из расчета по формуле (3-11) видно, что при замене масла советом диэлектрическая проницаемость пропитанного диэлектрика и емкость конденсатора возрастают на 40—55%.

Наиболее благоприятные условия работы в двухкомпонентном диэлектрике (клетчатка и пропитывающий состав) получаются при равенстве диэлектрических проницаемостей обеих составных частей. В этом случае напряженность электрического поля в клетчатке и в пропитывающем составе одинакова. Так как диэлектрическая проницаемость совола ($\varepsilon = 4,6 \div 5,2$) ближе к диэлектрической проницаемости клетчатки ($\varepsilon = 6,5$), чем масла ($\varepsilon = 2,2$), то при пропитке советом распределение напряженности электрического поля между обеими составными частями диэлектрика лучше, чем при пропитке маслом. Вследствие этого, при учете резко улучшенной стойкости совола к ионизации, можно применить при пропитке советом рабочие напряженности 15—17 *кв/мм* вместо 11—14 *кв/мм* при пропитке маслом при одинаковой кратковременной электрической прочности бумаги, пропитанной маслом и советом. Кроме того, бумажно-соволовые конденсаторы можно длительно эксплуатировать при температурах внутри конденсатора до 75—85° С, в то время как для бумажно-масляных конденсаторов эта температура не превышает 60—50° С.

Из сравнения удельных характеристик бумажно-соволовых и бумажно-масляных конденсаторов (табл. 27) видно, что в реальных конструкциях бумажно-соволовых конденсаторов удается получить в расчете на 1 *квар* снижение веса на 24—33% и снижение объема на 34—45%. В дальнейшем, при внедрении бумаги с малыми потерями, можно ожидать еще большего выигрыша в объеме и весе конденсаторов.

Вместе с тем совол по сравнению с маслом обладает и существенными недостатками, которые необходимо учитывать при конструировании конденсатора. Диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь совола

при изменении температуры меняются более резко, чем у масла (рис. 103).

Особенно резко изменяется ε совола при температуре ниже нуля, т. е. с переходом совола в твердое состояние. При этом заметно уменьшается емкость конденсатора. Помимо этого, из-за уменьшения объема совола при застывании в пропитанной изоляции образуются пустоты, снижается начальное напряжение ионизации, интенсивнее проходят процессы старения диэлектрика. В практике эксплуатации соволовых конденсаторов при пониженных температурах наблюдались случаи пробоя конденсаторов при включении. Переход совола в твердое состояние сопровождается ростом дипольных потерь, кривая $\operatorname{tg}\delta = f(t^\circ)$ при этом проходит через максимум.

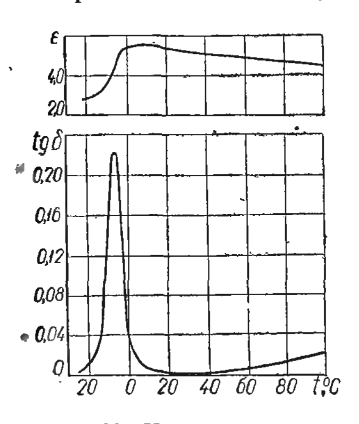


Рис. 103. Кривые зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь совола при частоте 50 *гц* от температуры.

Наличие максимума в зависимости $\operatorname{tg}\delta = f(t^\circ)$ полезно: при включении замороженного конденсатора вследствие повышенных значений $\operatorname{tg}\delta$ происходит саморазогрев конденсатора, вязкость совола уменьшается, одновременно снижается значение $\operatorname{tg}\delta$ и восстанавливается прежнее значение диэлектрической проницаемости и емкости конденсатора.

Добавляя к советолу маловязкие хлорированные углеводороды (трихлорбензол, хлорэтиленбензол), можно сдвинуть точку застывания и максимум дипольных потерь в сторону более низких температур. Тот же эффект можно получить, используя продукт с меньшей степенью хлорирования, например трихлордифенил.

В области повышенных температур, после 60—70° С, $\operatorname{tg}\delta$ совола возрастает вследствие увеличения ионной проводимости. Кроме того, $\operatorname{tg}\delta$ совола резко возрастает при попадании в него различных загрязнений, в частности при соприкосновении с материалами, применяемыми в конструкции конденсатора (конденсаторная бумага, фольга со следами технологической смазки, флюсы, применяемые при пайке). Для конденсаторов с повышенным значением $\operatorname{tg}\delta$ у бумаги,

пропитанной соволом, при необходимости обеспечения достаточной поверхности охлаждения не удается получить того снижения объема, которое соответствует теоретическим расчетам, учитывающим повышение значения диэлектрической проницаемости и рабочей напряженности поля при замене масла соволом. Дальнейшее снижение удельного объема может быть получено при использовании нового сорта бумаги с малыми потерями, а также оксидной бумаги.

При действии электрического поля высокой напряженности совол выделяет в 4—5 раз меньшее количество газов, чем масло в тех же условиях. Однако при напряженности поля порядка 35 *кв/мм* у краев конденсаторной секции, пропитанной соволом, наблюдается более интенсивное, чем при пропитке маслом, образование науглероженных ветвистых побегов, сопровождающееся необратимым увеличением $\mathrm{tg}\delta$ соволовых конденсаторов и уменьшением разрядного напряжения перекрытия по закраине. Вследствие этого необходимо ограничивать величину испытательного напряжения бумажно-соволовых конденсаторов и выбирать ее не выше 2,2 $U_н$, чтобы напряженность поля при испытательном напряжении не превышала 35 *кв/мм*.

Жидкие хлордифенилы и их пары обладают некоторой токсичностью и, в частности, оказывают раздражающее действие на кожу и слизистые оболочки организма человека. Поэтому необходимо проводить гигиенические мероприятия, исключающие возможность попадания совола на кожу и в дыхательные пути. Практика отечественных и зарубежных конденсаторных заводов показывает, что при соблюдении этих мероприятий работа с соволом становится безопасной.

Расчет и конструкция косинусного конденсатора

В качестве примера рассмотрим расчет и конструкцию однофазного конденсатора $P_р = 25$ *квар*, $U_н = 6{,}3$ *кв*, $C = 2{,}0$ *мкф*. Конденсатор должен удовлетворять требованиям ГОСТ 1282—58.

Выбор величины рабочей напряженности поля в диэлектрике и числа последовательных секций. Для косинусных конденсаторов при использовании бумаги КОН-1 рекомендуется выбирать $E_р = 12 \div 14$ *кв/мм*. Оптимальная толщина диэлектрика в соответствии с кривой для кратковременной электрической прочности бумажно-масляного диэлектрика (см. рис. 81) выбирается в пределах 60—120 *мк*.

Так как напряженность начала ионизации возрастает с уменьшением толщины диэлектрика (см. рис. 84), то целесообразно выбрать толщину диэлектрика ближе к нижнему пределу оптимальных значений, т. е. порядка 60—70 *мк*.

При этих толщинах и рекомендуемых рабочих напряженностях напряжение на секции конденсатора должно быть в пределах 720—980 *в*. При номинальных напряжениях выше 1000 *в* конденсаторы собирают из нескольких последовательно соединенных групп секций.

Для номинального напряжения 6300 *в* и напряжения секции 720—980 *в* число последовательных групп $N = 7 \div 8$. Выбираем $N = 8$, при этом напряжение на одной последовательной группе $U_г = 790$ *в*.

Для намотки секции косинусных конденсаторов используется бумага КОН-1 толщиной 8, 10 или 12 *мк*.

Толщину диэлектрика порядка 60—70 *мк* можно получить следующими комбинациями: 8 листов бумаги толщиной 8 *мк*, $d = 64$ *мк*; 6 листов толщиной 10 *мк*, $d = 60$ *мк*; 7 листов толщиной 10 *мк*, $d = 70$ *мк*; 5 листов толщиной 12 *мк*, $d = 60$ *мк*.

Стоимости 1 *кг* бумаги толщиной 12, 10 и 8 *мк* относятся как 1 : 1,17 : 2,02 (см. табл. 15). Учитывая это соотношение, выбираем вариант: 6 листов бумаги толщиной 10 *мк*.

В плоскопрессованных намотанных секциях коэффициент запрессовки обычно колеблется в пределах 0,8—0,95. Принимая $k_п = 0{,}886$, получаем действительную толщину диэлектрика между обкладками

$$d = \frac{nd_1}{k_п} = \frac{6 \cdot 10}{0{,}886} = 67{,}7 \text{ мк}.$$

Рабочая напряженность

$$E_р = \frac{U_г}{d} = \frac{0{,}79}{0{,}0677} = 11{,}6 \text{ кв/мм}.$$

Напряженность поля в диэлектрике при испытательном напряжении

$$E_{исп} = \frac{U_{исп}}{Nd} = \frac{25}{8 \cdot 0{,}0677} = 46{,}4 \text{ кв/мм}.$$

Коэффициент запаса на кратковременной электрической прочности при рабочем напряжении

$$k'_з = \frac{E_{пр}}{E_р} = \frac{130}{11{,}6} = 11{,}2;$$

при испытательном напряжении

$$k_з'' = \frac{E_{пр}}{E_{исп}} = \frac{130}{46,4} = 2,8,$$

где $E_{пр} = 130$ *кв/мм* взято по кривой *4* рис. 81. Фактически запас прочности будет несколько ниже, так как это значение $E_{пр}$ соответствует емкости порядка 0,1 *мкф*, а в данном случае значение емкости будет больше.

При выбранной величине напряженности поля в конденсаторной секции не должно возникать явление ионизации. Согласно уравнению (3-19) $\lg E_и = 2,65 - 0,5 \times \lg 67,7 = 1,735$. Тогда $E_и = 54,5$ *кв/мм*. Таким образом, отсутствие ионизации обеспечено как при рабочей, так и при испытательной напряженности.

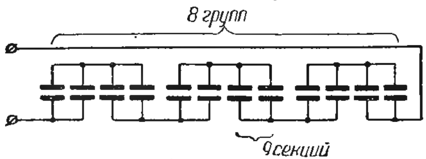


Рис. 104. Схема соединения последовательных групп и параллельно включаемых секций силового конденсатора.

Выбор числа параллельно соединенных секций в последовательной группе. При числе последовательных групп $N = 8$ и емкости конденсатора $C = 2$ *мкф* емкость последовательной группы $C_г = 2 \cdot 8 = 16$ *мкф*. При такой емкости и толщине диэлектрика порядка 60 *мк* намотанная секция получится большой толщины, что затрудняет ее сушку и пропитку и приводит к образованию большого числа складок при прессовке. Поэтому секции при напряжении порядка 1000 *в* изготовляют с емкостью 1,5 — 2 *мкф*.

Если емкость последовательной группы $C_г = 16$ *мкф*, необходимо иметь 8—10 параллельно соединенных секций.

При $M = 9$ емкость секции

$$C_с = \frac{C_г}{M} = \frac{16}{9} = 1,78 \text{ мкф}.$$

Схема конденсатора, определившаяся после расчета числа последовательных групп и параллельно соединенных секций, изображена на рис. 104.

Определение размеров секции конденсатора. Конденсаторная бумага выпускается в бобинах шириной от 12 до 750 *мм*. Ширина бобин устанавливается в заказе на конденсаторную бумагу. Наиболее часто применяется бумага шириной 47, 95, 140, 280 *мм*. На эти размеры следует ориенти-

роваться при выборе ширины секции. Для рассчитываемого конденсатора выбираем ширину $B_1 = 280$ *мм*.

Для определения ширины фольги и дальнейшего расчета размеров секции необходимо определить ширину закраины Δb.

Из условия равной электрической прочности на пробой по толщине диэлектрика и перекрытия по закраине следует, что

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{пк}} \text{ и } E_{\text{пр}}\, d = E_{\text{пк}}\, 2\Delta b, \qquad (3\text{-}27)$$

где $E_{\text{пр}} = 130$ *кв/мм* — электрическая прочность при номинальной толщине диэлектрика $d = 60$ *мк* (кривая *4*, рис. 81).

При толщинах 50—100 *мк* и ширине закраины Δb до 10 *мм* по опытным данным электрическая прочность по поверхности твердого диэлектрика в масле будет в пределах 0,5—0,7 *кв/мм*, отсюда

$$\Delta b = \frac{E_{\text{пр}} d}{2E_{\text{пк}}} = \frac{130 \cdot 0{,}06}{2 \cdot 0{,}5} = 7{,}5 \text{ мм}.$$

Учитывая отрицательный допуск по ширине рулона бумаги (—0,5 *мм*), положительный допуск по ширине рулона фольги (+ 0,25 *мм*), а также возможные сдвиги фольги при намотке, для секций силовых конденсаторов устанавливают минимальный размер закраины 8—10 *мм*. С некоторым запасом выбираем $\Delta b = 10$ *мм*.

Ширина электрода

$$b_0 = B_1 - 2\Delta b = 280 - 2 \cdot 10 = 260 \text{ мм}.$$

Для косинусных конденсаторов применяется обычно фольга толщиной 7—8 *мк* марки АД-1, более дешевая, чем фольга марок АО и А-1. Число витков намотанной секции определяется по формуле (1-53).

По условиям унификации производства число применяемых оправок различных диаметров должно быть ограничено. Наиболее часто применяются оправки диаметром 50—100 *мм*. Выбираем $D_0 = 68$ *мм*.

Диэлектрическая проницаемость высушенного и пропитанного маслом диэлектрика определяется по формуле (3-12). Подставляя значения $\varepsilon_{\text{п}} = 2{,}2$; $\varepsilon_{\text{к}} = 6{,}6$; $\gamma_{\text{к}} = 1{,}55$ *г/см³*; $\gamma = 0{,}92$ *г/см³* (для высушенной бумаги КОН-1) и $k_{\text{п}} = 0{,}886$, находим значение $\varepsilon = 3{,}4$. После подстановки всех значений в (1-53) находим число витков $w = 33$.

В прессованном состоянии секция имеет следующие размеры:

по толщине

$$\Delta_c = 2w2(d + d_0) = 2 \cdot 33 \cdot 2(67,6 + 8) \quad 10^{-3} \approx 10 \text{ мм};$$

по ширине

$$B = \Delta_c + \frac{\pi D_0}{2} = 10 + \frac{\pi \cdot 68}{2} = 116,8 \text{ мм}.$$

Учитывая холостые витки и закраины по длине секции (рис. 105), получим

$$\Delta_c = 10,1 \text{ мм};$$
$$B = 118 \text{ мм}.$$

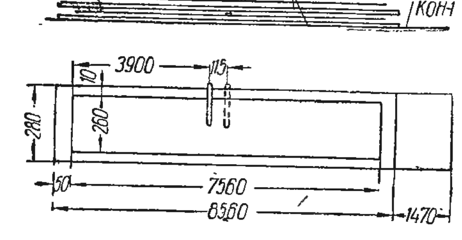


Рис. 105. Размеры секции в развернутом виде.

Для расчета веса фольги в секции необходимо определить длину электрода

$$l_0 = \pi \frac{D_н + D_о}{2} w = $$
$$= \pi \frac{D_о + \Delta_c + D_о}{2} w = $$
$$= \pi w \left(D_о + \frac{\Delta_c}{2}\right) = 756 \text{ мм}.$$

Вес фольги

$$G_ф = 2l_0 b d_0 \gamma_ф = 2 \cdot 75,6 \cdot 26 \cdot 8 \cdot 10^{-4} \cdot 2,7 = 85 \text{ г}.$$

Вес бумаги

$$G_б = 2l_б (b + 2\Delta b) d_н \gamma_б = 2 \cdot 756 \cdot 28 \cdot 6 \cdot 10^{-4} \quad 1,0 = 254 \text{ г}.$$

Учитывая холостые витки и расход бумаги на закраине по длине секции, принимаем $G_б = 260$ *г*.

При определении веса бумаги была взята номинальная толщина бумаги без учета коэффициента запрессовки и ее плотность $\gamma_б = 1$ *г/см*^{3}, соответствующая влажности бумаги 8%. В высушенном состоянии вес бумаги уменьшится на 8% и будет составлять 240 *г*.

Размеры секции и расположение выводных вкладышей показаны на рис. 106.

Изоляция между последовательными группами изготовляется из кабельной бумаги КВ-12 толщиной 120 *мк*. По ГОСТ 1282—58 испытательное напряжение конденсатора $U_{исп} = 2,2\ U_н$; это же соотношение справедливо и для испытательного напряжения секции

$$U_{исп} = 2,2U_с = 2,2 \cdot 0,79 = 1,74 \text{ кв}.$$

Электрическая прочность пропитанной маслом кабельной бумаги в зависимости от числа листов меняется в пределах 39—46 *кв/мм*, принимаем $E_{пр} = 45$ *кв/мм*.

Коэффициент запаса по испытательному напряжению для активного диэлектрика $k''_з = 2{,}8$, для изоляции между последовательными группами увеличиваем это значение

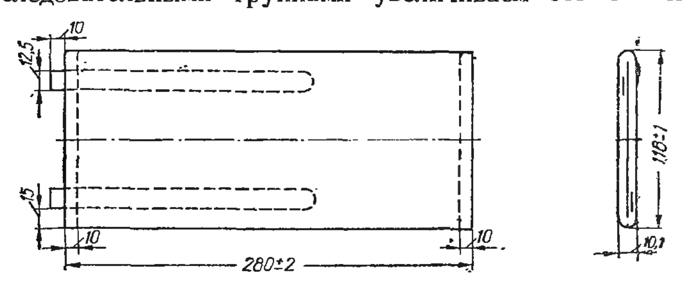


Рис. 106. Внешние размеры намотанной секции.

до 3. Подставляя выбранные значения $U_{исп}$, $E_{пр}$ и $k''_з$ в уравнение (1-37), получаем

$$d_{из} = 0{,}258 + \Delta \text{ мм}. \quad (3\text{-}28)$$

При $\Delta = 0{,}222$ *мм* $d_{из} = 0{,}48$ *мм*, что соответствует четырем листам бумаги КВ-12.

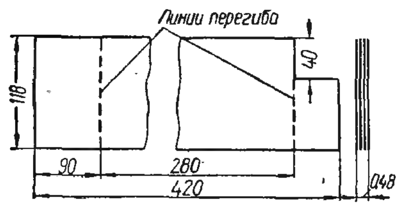


Рис. 107. Изоляция между последовательными группами секций.

Таблица 30

К расчету изоляции от корпуса

Испытательное напряжение, *кв*: постоянное	Испытательное напряжение, *кв*: переменное 50 *гц*	Минимальное число листов кабельной бумаги толщиной 0,12 *мм*
5	2,5	4
12	6	5
36	18	9
50	25	11
70	35	13

Ширина изоляции между группами должна быть равной ширине секции, т. е. 118 *мм*. По длине изоляция состоит из участка, соответствующего длине секции (280 *мм*), участка, равного толщине девяти секций (90 *мм*) и закрывающего торцы секций, свободные от выводов, и участка, закрывающего торцы секций с выводами (50 *мм*). Часть последнего участка имеет вырез для пропускания контактных перемычек между последовательными группами (рис. 107).

Изоляция от корпуса. При испытательном напряжении 25 *кв*, 50 *гц* по данным табл. 30 главная изоляция должна иметь не менее 11 листов кабельной бумаги КВ-12. При толщине одного листа равной 0,12 *мм* общая толщина изоляции составляет 1,32 *мм*.

При испытательном напряжении 25 *кв* напряженность поля в диэлектрике главной изоляции

$$E_{\text{исп}} = \frac{U_{\text{исп}}}{d} = \frac{25}{1{,}32} = 19 \text{ кв/мм}.$$

По данным рис. 108 при переменном напряжении для 11 листов кабельной бумаги толщиной по 0,12 *мм* (т. е. для суммарной толщины 1,32 *мм*) пробивное напряжение равно 57 *кв*, а

$$E_{\text{пр}} = \frac{57}{1{,}32} = 43 \text{ кв/мм}.$$

При этом запас по электрической прочности

$$k_з = \frac{43}{19} = 2{,}26.$$

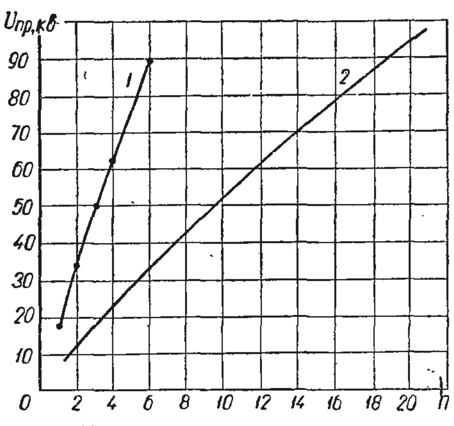


Рис. 108. Кривые зависимости пробивного напряжения от числа листов кабельной бумаги КВ-12 при напряжении: *1* — постоянном; *2* — переменном, $f = 50$ *гц*.

Это значение меньше значения коэффициента запаса по испытательному напряжению для активного диэлектрика ($k_з = 2{,}8$). Учитывая, что главная изоляция в конструкции конденсатора всегда дополняется межгрупповой изоляцией или прокладками из электрокартона толщиной 0,5 — 2 *мм*, следует считать, что фактический коэффициент запаса по электрической прочности для главной изоляции будет выше, чем тот же коэффициент для активного диэлектрика. Листы кабельной бумаги, из которых изготовляется главная изоляция, изгибаются по форме пакета конденсатора (рис. 109).

С боковых торцов главная изоляция дополняется торцовой изоляцией из электрокартона *8* толщиной 0,5 *мм* (рис. 110); дополнительной изоляцией от стяжных щек служат прокладки из электрокартона *6* толщиной 2 *мм*. Электрическая прочность пропитанного картона указана в табл. 31.

Межсекционные соединения изолированы друг от друга масляной прослойкой порядка 60 *мм* и от корпуса главной изоляцией.

Отводы, идущие к изолятору, проходят на близком расстоянии от стяжных щек и хомутов, поэтому необходимо изолировать их на полное испытательное напряжение конденсатора относительно корпуса. Одним из вариантов изолирования может быть обертывание отвода слоями кабельной бумаги КВ-12.

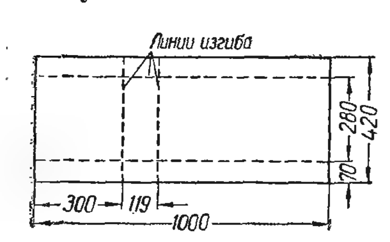


Рис. 109. Главная изоляция пакета конденсатора.

Таблица 31

Электрическая прочность электрокартона, пропитанного маслом при переменном напряжении

Толщина, *мм*	Пробивная напряженность, *кв/мм*
0,5	45
1,0	35
1,5	30
2,0	25
3,0	20

Общая компоновка пакета конденсатора. Пакет конденсатора изображен на рис. 110. На левой проекции снята торцовая изоляция, чтобы показать соединение параллельных секций и последовательных групп.

Пакет конденсатора, состоящий из восьми последовательных групп *13*, каждая из которых содержит девять параллельно соединенных секций *12*, собирается между двумя металлическими щеками *14* и стягивается двумя металлическими хомутами *11*. Между последовательными группами укладывается межгрупповая изоляция *10*, которая выступает за края секций, изгибается и закрывает их торцовые части. Межсекционные соединения *9* припаивают к выводам секций, обеспечивая их последовательное и параллельное соединение.

Начало первой группы и конец восьмой последовательной группы секций присоединены к отводам *1* и *18*, идущим к изоляторам. Отвод *18* от конца восьмой группы проходит между пакетом и нижней щекой, после чего изгибается и проходит к верхней части пакета вдоль торцов секций. В верхней части пакета отводы изолируются от верхней щеки *4* слоями бумаги КВ-12 *5* и коробочкой из электро-

картона *3*. От корпуса конденсатора отводы дополнительно изолируются прокладками из электрокартона. Еще одна прокладка из электрокартона *2* фиксирует положение концов отводов.

Под верхней щекой укладывается прокладка из электрокартона *6*, главная изоляция из 11 листов кабельной бу-

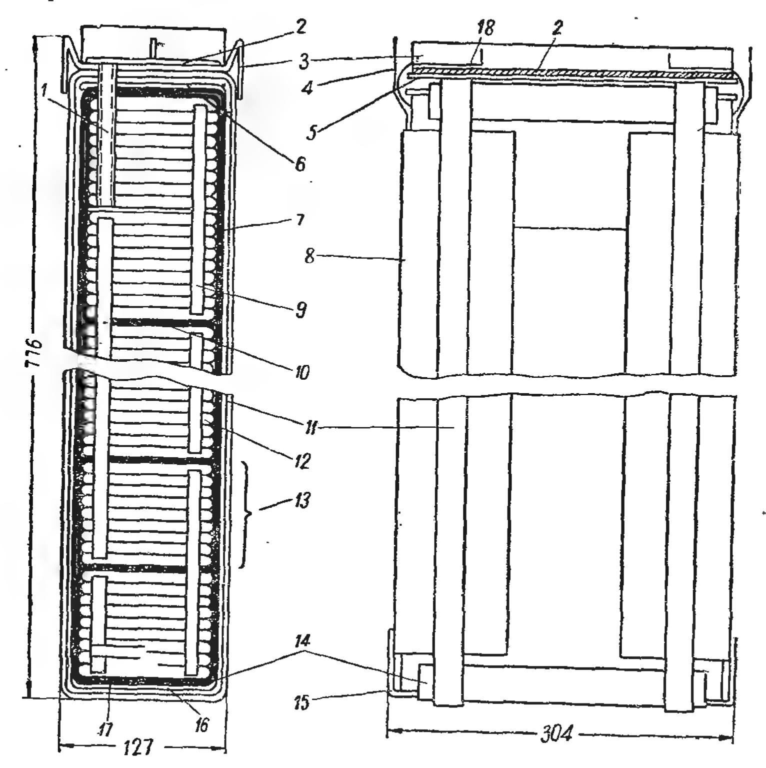


Рис. 110. Пакет силового конденсатора (6,3 *кв*, 25 *квар*).

маги *7* и межгрупповая изоляция. Под нижней щекой укладываются две прокладки из электрокартона *15* и *16*, главная изоляция, прокладка из картона *17* и межгрупповая изоляция *10*. Боковые стенки пакета с двух сторон защищаются дополнительным слоем изоляции из 11 листов кабельной бумаги.

Выбор изолятора. Выводными изоляторами рассчитываемого конденсатора служат проходные изоляторы класса

напряжения 6 *кв*, выдерживающие в соответствии с ГОСТ 1516—60 одноминутное испытательное напряжение 32 *кв*, что выше испытательного напряжения конденсатора на 7 *кв*. Одним из таких изоляторов может быть изолятор типа ИФВ-6, изображенный на рис. 111.

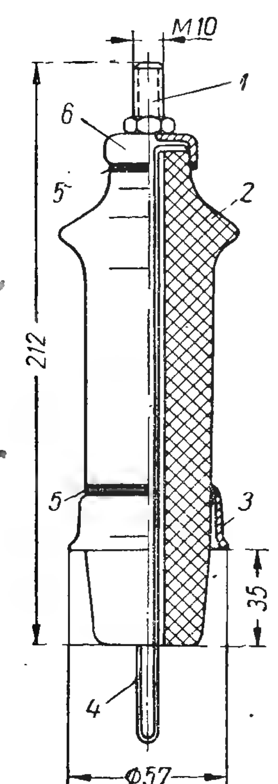


Рис. 111. Армированный изолятор типа ИФВ-6:

1 — стержень контактный; *2* — изолятор фарфоровый; *3* — переходное кольцо; *4* — отвод изолятора; *5* — места пайки; *6* — колпачок.

Рассчитаем этот изолятор согласно данным § 7. Толщина стенки изолятора 15 *мм*. В соответствии с кривой на рис. 51 для этой толщины пробивное напряжение (при длительном приложении напряжения) равно примерно 60 *кв*.

Коэффициент запаса по испытательному напряжению конденсатора

$$k_з = \frac{U_{пр}}{U_{исп}} = \frac{60}{25} = 2{,}4.$$

Разрядное расстояние на поверхности изолятора по воздуху $h = 12$ *см*. Из уравнения (1-174) напряжение перекрытия

$$U_{пк} = 14 + 3{,}16h = 14 + 3{,}16 \cdot 12 = 52 \text{ кв}.$$

Коэффициент запаса по испытательному напряжению конденсатора

$$k_з = \frac{U_{пк}}{U_{исп}} = \frac{52}{25} = 2{,}08.$$

Длина пути перекрытия в нижней части изолятора под маслом 6,2 *см*. Разрядная напряженность по поверхности фарфора под маслом и для промежутков до 30 *см* находится в пределах 6—7,5 *кв/см*, причем бо́льшие значения относятся к меньшим промежуткам.

Принимая для 6,2 *см* $E_{пк} = 7{,}5$ *кв/см*, получаем

$$U_{пк} = 7{,}5 \cdot 6{,}2 = 46{,}5 \text{ кв}.$$

Коэффициент запаса по испытательному напряжению конденсатора

$$k_з = \frac{U_{пк}}{U_{исп}} = \frac{46,5}{25} = 1,86.$$

Полученные коэффициенты запаса по электрической прочности достаточны, и выбранный изолятор является пригодным для использования в конструкции конденсатора на рабочее напряжение 6,3 *кв*.

Конструкция бака. Бак конденсатора (рис. 112) изготовляется сварным из декапированной стали толщиной 1,5 *мм* и имеет три основных детали: боковые стенки *2*, дно *6*, крышку *3* и дополнительные детали: четыре крюка для транспортировки *1* и пластинки для крепления маркировочной таблички *5*. К крышке приварена заземляющая скоба со шпилькой и гайками *4*. На крышке выштампованы два отверстия для изоляторов и два заливочных отверстия, закрывающихся после пропитки пробками. Вокруг краев этих четырех отверстий выштампованы кольцевые углубления для обеспечения герметичности при припайке фланцев изоляторов и пробок.

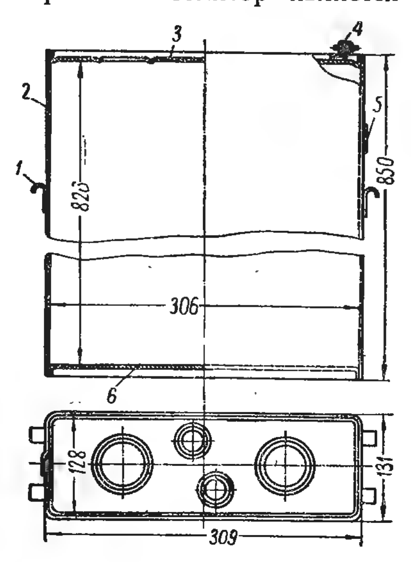


Рис. 112. Бак конденсатора.

Внутренние размеры бака выбираются с учетом свободной укладки пакета в бак, для чего между стенками бака и пакетом предусматриваются зазоры размером 1—2 *мм*. Внутренний размер бака по высоте определяется высотой пакета, длиной нижней части изолятора. Последний размер необходим для размещения выводов конденсатора и для их монтажа во время сборки конденсатора. В рассматриваемом конденсаторе этот размер принят равным 32 *мм*. Таким образом, внутренние размеры бака равны 128 × 306 × × 826 *мм*.

Определение максимальной температуры внутри конденсатора. При расчете максимальной температуры внутри секции конденсатора принимаем, что тепловой поток направлен вдоль слоев бумаги и фольги к закругленному краю секции — по направлению оси z (рис. 113).

Пройдя расстояние $\frac{b}{2} - \frac{\Delta_c}{2}$, поток проходит далее перпендикулярно слоям бумаги и фольги, расстояние $\Delta_4 = \frac{\Delta_c}{2}$, затем расстояние через слой главной изоляции, состоящий из 11 листов кабельной бумаги общей толщиной 1,32 *мм*, и слой электрокартона толщиной 2 *мм*. Так как коэффициент теплопроводности для электрокартона и пропитанной бумаги одинаков, то эти два слоя объединяем в один толщиной $\Delta_3 = 0{,}332$ *мм*. Затем тепловой поток проходит через слой масла $\Delta_2 = 0{,}178$ *мм* и стальную стенку бака $\Delta_1 = 0{,}15$ *мм*. Учитывая высокую теплопроводность металлических стенок бака, считаем, что теплоотдача в окружающую среду идет от всех четырех боковых стенок бака. Максимальная температура в центре пакета определяется по формуле (1-162).

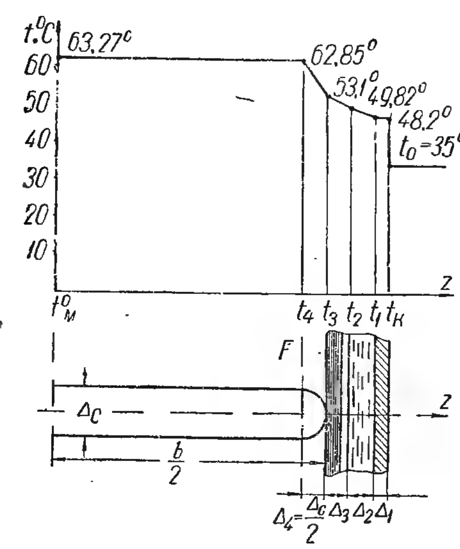


Рис. 113. Диаграмма распределения температуры внутри конденсатора.

Данные для расчета: ширина секции $b = 11{,}8$ *см*; толщина секции $\Delta_c = 1{,}01$ *см*; толщина и коэффициент теплопроводности слоя главной изоляции $\Delta_3 = 0{,}332$ *см*, $\lambda_3 = 4{,}1 \ 10^{-4}$; толщина и коэффициент теплопроводности слоя масла $\Delta_2 = 0{,}178$ *см*, $\lambda_4 = 4{,}3 \cdot 10^{-4}$ (при $t^\circ = 50^\circ$ С); толщина и коэффициент теплопроводности стенки бака $\Delta_1 = 0{,}15$ *см*, $\lambda_1 = 0{,}14$; толщина и коэффициент теплопроводности фольги $d_0 = 0{,}0008$ *см*, $\lambda_ф = 0{,}48$; толщина и коэф-

фициент теплопроводности слоя активного диэлектрика $nd_1 = 0{,}0067$ *см*, $\lambda_б = 4{,}1 \cdot 10^{-4}$. Все значения коэффициента теплопроводности имеют размерность *кал/сек · см · град*. Коэффициент теплоотдачи с поверхности металлического бака $\alpha_т = 3{,}1 \cdot 10^{-4}$ *кал/сек² · град*, тангенс угла диэлектрических потерь в активном диэлектрике при 50° C $\operatorname{tg}\delta = 5 \cdot 10^{-3}$, $\varepsilon = 3{,}4$, $E_р = 11{,}6$ *кв/мм* $= 1{,}16$ *в/см*, максимальная температура окружающей среды $t_о = 35°$ C.

По приведенным данным рассчитаем отдельные члены уравнения (1-162).

Количество выделенного тепла по уравнению (1-124)

$$Q = 0{,}24U^2C\omega \operatorname{tg}\delta = 0{,}24 \cdot 6300^2 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 314 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 30\ кал/сек;$$

$$k_з = 1 + \alpha_т\left(\frac{\Delta_1}{\lambda_1} + \frac{\Delta_2}{\lambda_2} + \frac{\Delta_3}{\lambda_3}\right) = 1 + 3{,}1 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{0{,}15}{0{,}14} + \frac{0{,}178}{4{,}3 \cdot 10^{-4}} + \frac{0{,}332}{4{,}1 \cdot 10^{-4}} = 1{,}38.$$

Боковая поверхность охлаждения бака (рис. 112)

$$S_{охл} = 2 \cdot 85(30{,}9 + 13{,}1) = 7480\ см^2.$$

Активная проводимость диэлектрика по уравнению (1-139)

$$\gamma_а = 0{,}55 \cdot 10^{-12} f\varepsilon \operatorname{tg}\delta = 0{,}55 \cdot 10^{-12} \cdot 50 \cdot 3{,}4 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 4{,}67 \cdot 10^{-13}\ ом^{-1} \cdot см^{-1}.$$

Коэффициент теплопроводности вдоль слоев секции по уравнению (1-133)

$$\lambda_{\parallel} = \lambda_б \frac{nd_б}{nd_б + d_ф} + \lambda_ф \frac{d_ф}{nd_б + d_ф} = 4{,}1 \cdot 10^{-4} \frac{0{,}0067}{0{,}0075} + 0{,}48 \frac{0{,}0008}{0{,}0075} = 5{,}13 \cdot 10^{-2}\ кал/сек \cdot см \cdot град.$$

Коэффициент теплопроводности поперек слоев секции по уравнению (1-152)

$$\lambda_{\perp} = \frac{\lambda_б \lambda_ф (nd_б + d_ф)}{\lambda_ф nd_б + \lambda_б d_ф} = \frac{4{,}1 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}48\,(0{,}0067 + 0{,}0008)}{0{,}48 \cdot 0{,}0067 + 4{,}1 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}0008} = 4{,}59 \cdot 10^{-4}\ кал/сек \cdot см \cdot град.$$

После подстановки полученных значений в выражение (1—162) получаем

$$t^о_{макс} = 63{,}27°\ C.$$

На рис. 113 дана диаграмма распределения температуры вдоль направления z, рассчитанная по уравнениям (1-129) — — (1-132), (1-157). По такой диаграмме можно определить участки, имеющие наибольшее тепловое сопротивление. В рассматриваемом конденсаторе максимальный перепад температур, равный 9,75° С, соответствует закругленной части секции (участок Δ_4). Если необходимо, то по данным диаграммы корректируют размеры и материалы отдельных участков, чтобы снизить максимальную температуру в центре пакета.

В данном примере максимальная температура не превышает допускаемой температуры для бумажно-масляного диэлектрика, равной 65—70° С, следовательно, необходимости в такой корректировке нет.

Проведенный тепловой расчет приближенный; фактически максимальная температура в диэлектрике будет ниже расчетной, так как не были учтены теплоотдача от поверхности крышки и дна бака, теплопередача за счет конвекции масла, теплопередача в направлении, перпендикулярном слоям бумаги и фольги, и по направлению к закраинам секции. В условиях эксплуатации температура окружающего воздуха обычно ниже 35° С, что соответственно снижает температуру внутри пакета конденсатора.

Удельные характеристики конденсатора. По объему бака ($V = 34\,400$ *см²*) и весу конденсатора ($G = 60$ *кг*) рассчитываются удельные характеристики конденсатора.

Для косинусных конденсаторов обычно вычисляют только вес и объем, приходящийся на 1 *квар*:

$$g_{\text{уд}} = \frac{G}{P_{\text{р}}} = \frac{60}{25} = 2{,}4 \text{ кг/квар};$$

$$v_{\text{уд}} = \frac{V}{P_{\text{р}}} = \frac{34{,}4}{25} = 1{,}39 \text{ дм}^3\text{/квар}.$$

Обратная величина — удельная реактивная мощность — равна 0,72 *квар/дм³*.

Сравнивая полученные значения удельных характеристик с удельными характеристиками ранее выпущенных конденсаторов с близкими номинальными данными, можно оценить экономичность новой конструкции. Так, например, конденсатор КМ2-6,3 мощностью $P_{\text{р}} = 25{,}8$ *квар*, выпускавшийся ранее, имел $g_{\text{уд}} = 2{,}52$ *кг/квар* и $v_{\text{уд}} = 1{,}49$ *дм³/квар*. Хотя удельные характеристики у рассчитанного конденсатора лучше, чем у КМ2-6,3, их нельзя считать предельными.

При повышении качества исходных материалов, совершенствовании процессов сушки и пропитки и дальнейшей модернизации конструкции удельные характеристики конденсатора можно дополнительно улучшить. Заменяя конденсаторное масло соволом для конденсатора $P_р = 29$ *квар*, $U_р = 6{,}3$ *кв*, можно получить $g_{уд} = 1{,}89$ *кг/квар* и $v_{уд} = 1{,}00$ *дм³/квар*.

При использовании высокоочищенного трихлордифенила и бумаги с малыми потерями американские фирмы получают для конденсаторов мощностью 50—100 *квар* удельные характеристики до 0,5 *кг/квар* и до 0,3 *дм³/квар* (что соответствует удельной мощности выше 3 *квар/дм³*).

§ 16. БУМАЖНЫЕ СИЛОВЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ ДЛЯ СРЕДНИХ ЧАСТОТ 0,5—10 *КГЦ*

Силовые конденсаторы с бумажным диэлектриком для повышенной частоты обычно рассчитываются на работу в диапазоне частот от 0,5 до 10 *кгц*, а иногда даже и на более широкий диапазон от 0,1 до 20 *кгц*. Такие конденсаторы используются главным образом в электротермических установках с питанием от машинных генераторов, а также и в некоторых других устройствах, например для повышения коэффициента мощности электродвигателей повышенной частоты, в схемах питания бесконтактных рудничных электровозов и т. д. Кривые зависимости угла потерь бумажных конденсаторов от частоты, по данным С. К. Медведева, показаны на рис. 114. При увеличении частоты до значений, превышающих 10—20 *кгц*, угол потерь бумажных конденсаторов начинает резко увеличиваться, поэтому применять их не целесообразно, даже при использовании форсированного охлаждения.

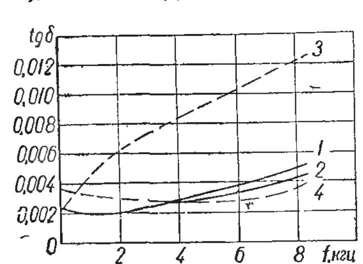


Рис. 114. Кривые зависимости угла потерь бумажных конденсаторов от частоты:
1 — бумажно-масляный при 20°С; *2* — то же, при 60°С; *3* — бумажно-соволовый при 20°С; *4* — то же, при 60°С.

Удельные потери в конденсаторах [см. формулу (1-140)] зависят от произведения $\varepsilon f E^2 \mathrm{tg}\delta$, следовательно, они увеличиваются не только за счет роста tgδ с частотой, но и за

счет возрастания самой частоты. В связи с этим приходится снижать значения $E_р$ по сравнению с работой конденсатора при частоте 50 *гц*, а кроме того, принимать меры для улучшения отвода тепла из секций. Для этого применяют намотку секций с выступающей фольгой, бумагу с уменьшенной шириной (95 *мм*), а фольгу с увеличенной толщиной (16 *мк*). При этом снижаются потери в обкладках и практически их можно не учитывать при расчете.

Для улучшения отвода тепла обкладки, выступающие с одного из торцов секций, непосредственно прижимаются к охлаждаемой поверхности. При использовании водяного охлаждения змеевик, вводящий охлаждающую воду, обычно прямо припаивается к фольге, выступающей с одного из торцов секции. В этом случае можно предполагать, что весь тепловой поток направлен в сторону охлаждающей системы. Система охлаждения с припайкой змеевика к обкладкам одного знака обычно применяется при частотах от 1 *кгц* и выше.

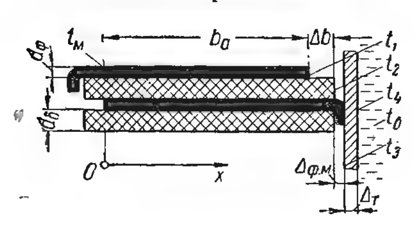


Рис. 115. Схема к тепловому расчету конденсатора.

Тепловой расчет в этом случае несколько отличается от рассмотренного в параграфе 6. Рассмотрим основы такого расчета по М. И. Мантрову с учетом некоторых замечаний С. К. Медведева. Схема к этому расчету показана на рис. 115.

В соответствии с данными С. К. Медведева предполагаем, что весь тепловой поток конденсатора направлен направо, в сторону охлаждающего змеевика; тогда максимальное значение температуры будет на линии, проходящей через точку O, откуда будем вести отсчет расстояния x в направлении движения теплового потока. Количество тепла, выделяемое в конденсаторе и рассчитанное на сечение в направлении движения теплового потока (в направлении оси x), равное 1 $см^2$, можно представить так:

$$Q = \gamma_а E^2 b_а \ вт/см^2, \tag{3-29}$$

где $b_а$ — активная ширина фольги, *см*;

E — напряженность, *в/см*;

$\gamma_а$ — активная проводимость диэлектрика, $ом^{-1} \cdot см^{-1}$ [см. формулу (1-139)].

При тепловом равновесии все это тепло отводится к охлаждающей воде

$$Q = \alpha_т (t_4 - t_0), \tag{3-30}$$

где $\alpha_т$ — коэффициент теплоотдачи проточной воды, *вт/см² · град*;

t_4 — температура внутренней поверхности стенки трубы змеевика °*C*;

t_0 — температура охлаждающей воды средняя, °C.

Поток тепла, выделенный в секциях конденсатора на длине $x = b_a$, далее проходит последовательно включенные тепловые сопротивления: по закраине секции Δb с изменением температуры от t_1 до t_2, по слою из фольги и прослоек масла $\Delta_{ф.\,м}$ с изменением температуры от t_2 до t_3, и, наконец, через стенку трубы толщиной $\Delta_т$ с изменением температуры от t_3 до t_4. Поскольку при этом величина потока тепла не меняется, по аналогии с выражением (1-122) имеем

$$Q = \lambda_в \frac{t_1 - t_2}{\Delta_в} = \lambda_{ф.\,м} \frac{t_2 - t_3}{\Delta_{ф.\,м}} = \lambda_т \frac{t_3 - t_4}{\Delta_т}. \tag{3-31}$$

После несложных преобразований получаем

$$Q = \frac{t_1 - t_4}{\frac{\Delta_в}{\lambda_в} + \frac{\Delta_{ф.\,м}}{\lambda_{ф.\,м}} + \frac{\Delta_т}{\lambda_т}} = \frac{t_1 - t_4}{\zeta}, \tag{3-32}$$

где ζ — суммарное тепловое сопротивление указанных выше последовательно включенных слоев,

$$\zeta = \frac{\Delta_в}{\lambda_в} + \frac{\Delta_{ф.\,м}}{\lambda_{ф.\,м}} + \frac{\Delta_т}{\lambda_т}; \tag{3-33}$$

$\lambda_т$ — коэффициент теплопроводности материала стенок трубы змеевика.

Из уравнения (3-30) получаем

$$t_4 - t_0 = \frac{Q}{\alpha_т}. \tag{3-34}$$

Аналогично выражению (1-146) зависимость температуры от расстояния по оси x в пределах активной ширины фольги

$$\lambda_{||} \frac{d^2 t}{dx^2} + \gamma_a E^2 = 0. \tag{3-35}$$

Коэффициент теплопроводности секции в направлении слоев фольги и бумаги $\lambda_{||}$ определяется по формуле (1-133).

По всей длине $b_а$ величина E постоянна; учитывая малый перепад температуры на этой длине, можно считать, что и $\gamma_а$ будет примерно постоянной; интегрируя уравнение (3-35) с учетом этих соображений, получаем

$$\lambda_{||}t + \gamma_а E^2 \frac{x^2}{2} = C_1 x + C_2. \qquad (3\text{-}36)$$

При $x = 0$ температура имеет максимум, т. е. $t = t_{макс}$ и $\frac{dt}{dx} = 0$; это дает $C = 0$ и

$$C_2 = \lambda_{||} t_{макс}.$$

Подставляя в выражение (3-36) значения постоянных C_1 и C_2, получаем

$$t = t_{макс} - \gamma_а E^2 \frac{x^2}{2\lambda_{||}}. \qquad (3\text{-}37)$$

Полагая при $x = b_а$ $t = t_1$, находим перепад температуры в рабочей части секции

$$t_{макс} - t_1 = \gamma_а E^2 \frac{b_а^2}{2\lambda_{||}}. \qquad (3\text{-}38)$$

Используя выражения (3-29), (3-33), (3-34) и (3-38), получаем величину перепада температур от наиболее нагретой части конденсатора к охлаждающей воде

$$t_{макс} - t_0 = \gamma_а E^2 b_а \left(\frac{b_а}{2\lambda_{||}} + \zeta + \frac{1}{\alpha_т} \right). \qquad (3\text{-}39)$$

Согласно выражению (3-33) для вычисления теплового сопротивления ζ, входящего в формулу (3-39), необходимо найти коэффициенты теплопроводности $\lambda_в$ и $\lambda_{ф.\,м}$. Для их вычисления С. К. Медведев предложил формулы:

$$\lambda_в = \frac{2\lambda_б d_б + \lambda_ф d_0}{2d_б + d_0}; \qquad (3\text{-}40)$$

$$\lambda_{ф.\,м} = \frac{\lambda_м \lambda_ф}{\lambda_м \frac{\Delta_ф}{\Delta_{ф.\,м}} + \lambda_ф \frac{\Delta_м}{\Delta_{ф.\,м}}}, \qquad (3\text{-}41)$$

где $\lambda_б$ и $\lambda_ф$ — коэффициенты теплопроводности пропитанной бумаги и фольги;

$d_б$ и d_0 — соответственно их толщины (под $d_б$ понимается суммарная толщина бумажного диэлектрика, т. е. произведение из числа слоев бумаги между обкладками на толщину одного слоя бумаги);

$\lambda_м$ — коэффициент теплопроводности масла в тонких прослойках без учета конвекции;

$\Delta_{ф.\,м}$ — средний зазор между пакетом секций и охлаждающей трубой, заполненной фольгой и масляными прослойками, который вычисляется, исходя из размеров корпуса, пакета и диаметра трубы охлаждающего змеевика;

$\Delta_ф$ — суммарная толщина обкладок одного знака в конденсаторной секции; $\Delta_ф = 2wd_0$;

$\Delta_м = \Delta_{ф.\,м} - \Delta_ф$ — суммарная толщина масляных прослоек*.

По формуле (3-39) можно вычислить значение максимальной температуры внутри конденсатора, если будет известно значение коэффициента $\alpha_т$.

Полагая, что все тепло, выделяющееся в конденсаторе, передается охлаждающей воде, можно записать

$$\gamma_а E^2 b_а = \alpha_т (t_4 - t_0) = \frac{V_в c_в \gamma_в (t_{в2} - t_{в1})}{0{,}24S}, \qquad (3\text{-}42)$$

где $V_в$ — объем воды, протекающей через трубку змеевика, *см³/сек*;

$c_в$ и $\gamma_в$ — теплоемкость и плотность воды; $c_в = 1$ *кал/град*, а $\gamma_в = 1$ *г/см³*;

$t_{в2} - t_{в1}$ — перепад температуры в змеевике при охлаждении одного конденсатора (часто применяется последовательное включение змеевиков у нескольких конденсаторов);

S — поверхность широкой стороны пакета секций, в контакте с которой находится змеевик с проточной водой, *см²*.

---

* Если фольга припаяна к трубе змеевика, то масляные прослойки зашунтированы фольгой, и тепловым сопротивлением слоя $\Delta_{ф.\,м}$ можно пренебречь, так же, как и для стенки медной трубки — $\Delta_т$.

Из выражения (3-42) находим коэффициент

$$\alpha_т = \frac{V_в c_в \gamma_в (t_{в2} - t_{в1})}{0,24S(t_4 - t_0)}. \qquad (3\text{-}43)$$

Значение величин $V_в$ и $\Delta t_в = t_{в2} - t_{в1}$ при выполнении расчета можно выбрать из табл. 32.

Таблица 32

К расчету бумажного конденсатора с водяным охлаждением

Число последовательно включенных змеевиков	Расход воды $V_в$, л/мин	Расход воды $V_в$, см³/сек	Повышение температуры воды $\Delta t_в$, °C, при мощности 160 *квар*	Перепад давления, атмосферы* (приблизительно)
1	2	33,3	3—4	0,035
2	2	33,3	6—8	0,07
3	2	33,3	9—12	0,105
1	4	66,6	1,5—2	0,115
2	4	66,6	3—4	0,23
3	4	66,6	4,5—6	0,35
1	6	100	1—1,5	0,38
2	6	100	2—3	0,76
3	6	100	3—4	0,14

* В системе СИ давление выражается в $н/м^2$ или барах: 1 *атм* = 1,01326 × 10⁵ *н/м²* = 1,01326 *бар*.

Таблица 33

Значения напряженности поля, допускаемые при длительной работе бумажно-масляных конденсаторов при повышенных частотах

Рабочая частота, *гц*	Напряженность поля, *кв эфф/мм*: Естественное охлаждение	Напряженность поля, *кв эфф/мм*: Искусственное охлаждение
500	8—9	10—11
1 000	7—8	8,5—10
2 500	6—7	6,5—7,5
10 000	3—4	4,5—5,5

Рабочую напряженность поля для рассматриваемого типа конденсаторов рекомендуется выбирать из табл. 33. Эти значения соответствуют толщине диэлектрика порядка 40—100 *мк*. Согласно формуле (1-4) толщина диэлектрика находится делением заданного рабочего напряжения на выбранное значение $E_р$. Указанные в табл. 33 значения выбраны на основе практического опыта с таким расчетом, чтобы нагрев конденсаторов не превосходил допускаемых значений и чтобы при работе в них не возникала ионизация.

Испытательное напряжение в маркировке конденсаторов этого типа не указывается, но в каталоге отмечается, что на заводе конденсаторы проходят испытание воздействием постоянного напряжения порядка (6 ÷ 8) $U_р$, т. е. 7—8 *кв*, в соответствии с этим для конденсаторов данного типа величина закраины выбирается порядка 7,5 *мм*.

Намотка секций — с выступающей фольгой; выпуск фольги за край бумаги для пайки торцов берется порядка 2,5 *мм*.

При ширине бумаги 95 *мм* и ширине фольги 90 *мм* получаем активную ширину обкладки $b_а$ = 80 *мм* и длину намотанной секции около 100 *мм* до того, как смята фольга, выступающая на торцах секции (рис. 116).

Емкость конденсаторов типа ЭМВ средней частоты, предназначаемых для применения в электротермических установках, разбивается на две или четыре части (группы секций); в каждой группе имеется один изолированный вывод, а второй вывод — общий для секций всех групп. Поскольку число групп четное, можно разбить их пополам и, применив последовательное соединение половин, получить удвоение напряжения при уменьшении общей емкости в 4 раза; суммарная реактивная мощность конденсатора при этом не изменяется. В конденсаторе типа ЭМВП применяется пять групп секций, т. е. нечетное число: в этом случае последовательное включение для удвоения напряжения не применяется. Если в конденсаторах типа ЭВМ все группы секций имеют равные емкости, то в конденсаторах типа ЭМВП имеется пять ступеней емкости с отношением 1 : 2 : 4 : 8 : 8 (или 9), что дает возможность применять их для более точной регулировки емкости колебательного контура.

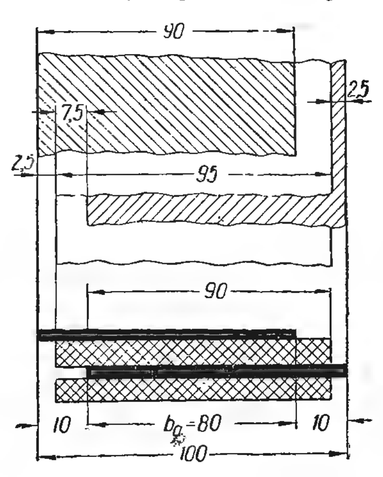


Рис. 116. Размеры и расположение лент бумаги и фольги при намотке.

Каждая группа разбивается на секции, соединяемые параллельно через плавкие предохранители для повышения надежности; при случайном пробое одной из секций плавкий предохранитель перегорает, отсоединяя пробитую секцию, и конденсатор продолжает работать. Емкость отдельных секций берется порядка 0,3—0,7 *мкф* в зависимости от рабочего напряжения; так, например, в конденсаторах

8 *кгц* и 375 *в* емкость секции составляет 0,63—0,64 *мкф*, а в конденсаторах на 500 *в* — 0,33—0,35 *мкф*.

Диаметр намоточной оправки для намотки секций увеличен: $D_о = 165$ *мм*, так что секции отличаются по конфигурации от обычных секций для силовых конденсаторов на частоту 50 *гц* (рис. 117).

Размеры секции рассчитываются по следующим формулам:

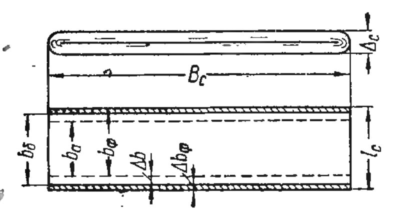


Рис. 117. Секция силового конденсатора для работы при средних частотах 0,5—10 *кгц*.

длина секции

$$l_с = b_б + 2\Delta b_ф; \quad (3\text{-}44)$$

ширина секции

$$B_с = \frac{\pi D_0}{2} + \Delta_с + \Delta B; \quad (3\text{-}45)$$

толщина секции

$$\Delta_с = 4w\left(\frac{nd_1}{k_п} + d_0\right) + 4\frac{nd_1}{k_п}. \quad (3\text{-}46)$$

В этих формулах:

$\Delta b_ф$ — выпуск фольги для пайки с одного торца секции (порядка 2,5 *мм*);

ΔB — допуск на отклонение ширины секции (порядка $1 \div 3$ *мм*);

$k_п = 0{,}8 \div 0{,}9$ — для конденсаторов средней частоты.

Для определения числа витков секции w можно использовать выражения (1-55) и (1-56); при этом надо учитывать коэффициент запрессовки, т. е. вместо толщины диэлектрика d подставлять в формулы значение $\frac{nd_1}{k_п}$. При вычислении $K_и$ вместо b надо подставлять $b_а$ — активную ширину фольги.

В данном случае

$$b_а = b_ф - \Delta b - \Delta b_ф, \quad (3\text{-}47)$$

где Δb — закраина, равная 7,5 *мм*.

Для вычисления эффективного значения диэлектрической проницаемости пропитанной бумаги с учетом коэффициента запрессовки используется формула (3-10)

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_к}{\frac{\varepsilon_к}{\varepsilon_п} - k_п \frac{\gamma}{\gamma_к}\left(\frac{\varepsilon_к}{\varepsilon_п} - 1\right)}.$$

Для клетчатки $\varepsilon_к = 6,5$ и $\gamma_к = 1,55$ *г/см*³; при использовании бумаги КОН-1 $\gamma = 1$ *г/см*³; $\varepsilon_п$ — диэлектрическая проницаемость пропиточной массы, которую для масла можно принять равной 2,2, а для совола — порядка 5.

Проведем примерный расчет конденсатора типа ЭМВ, пропитанного маслом, с номинальными данными: рабочая частота 8 *кгц*, номинальное напряжение 500 *в* и номинальная суммарная емкость 12,6 *мкф*; номинальная реактивная мощность такого конденсатора

$$P_р = 2 \cdot 3,14 \cdot 8 \cdot 10^3 \cdot 500^2 \cdot 12,6 \cdot 10^{-6} = 158 \cdot 10^3\ вар = 158\ квар.$$

Конденсатор разбит на четыре группы емкостей по 12,6 : 4 = 3,15 *мкф*. Принимаем число секций в каждой группе равное 9, тогда емкость одной секции

$$C_с = 3,15 : 9 = 0,35\ мкф.$$

По табл. 33 для случая искусственного охлаждения и при частоте 10 *кгц* (наиболее близкой к значению 8 *кгц*) находим допускаемое значение $E_р = 4,5 \div 5,5$ *кв/мм*; принимаем для данного конденсатора $E_р = 5$ *кв/мм*.

Тогда суммарная толщина диэлектрика

$$d = \frac{500}{5 \cdot 10^3} = 0,1\ мм = 100\ мк.$$

Принимая толщину одного слоя бумаги $d_1 = 10$ *мк*, получаем число слоев бумаги между обкладками $n = \frac{100}{10} = 10$.

Толщину фольги принимаем $d_0 = 16$ *мк*. При указанных выше значениях ширины фольги, закраины и выпуска фольги с торца для пайки согласно выражению (3-47) получаем значение активной ширины фольги

$$b_а = 90 - 7,5 - 2,5 = 80\ мм.$$

Величину коэффициента запрессовки принимаем $k_п = 0,9$. Величина диэлектрической проницаемости для бумаги КОН-1, пропитанной маслом,

$$\varepsilon = \frac{6,5}{\frac{6,5}{2,2} - 0,9\frac{1,0}{1,55}\left(\frac{6,5}{2,2} - 1\right)} = 3,5.$$

Для вычисления числа витков секции находим величину коэффициента

$$K_н = \frac{0{,}144\left(\frac{100}{0{,}9} + 16\right)}{3{,}5 \cdot 8} = 73.$$

Согласно формуле (1-55) наружный диаметр секции, намотанной на оправку $D_о = 16{,}5$ *см*,

$$D = \sqrt{16{,}5^2 + 73 \cdot 0{,}35} = 17{,}2 \text{ см}.$$

Число витков секции согласно (1-56)

$$w = \frac{2{,}5 \cdot 10^3 (17{,}2 - 16{,}5)}{\frac{100}{0{,}9} + 16} = 14.$$

Размеры секции: длина

$$l_с = 95 + 2 \cdot 2{,}5 = 100 \text{ мм};$$

толщина

$$\Delta_с = 4 \cdot 14\left(\frac{100}{0{,}9} + 16\right) + 4 \cdot \frac{100}{0{,}9} = 8{,}5 \cdot 10^3 \text{ мк} = 8{,}5 \text{ мм};$$

ширина

$$B_с = \frac{3{,}14 \cdot 165}{2} + 8{,}5 + 2 = 270{,}5 \text{ мм}.$$

Площадь торца секции составляет примерно $27{,}05 \cdot 0{,}85 = 23$ *см*². Общая площадь торцов всех секций конденсатора, с одной стороны прижатой к змеевику,

$$S = 4 \cdot 9{,}23 = 825 \text{ см}^2.$$

Коэффициент теплоотдачи от секции к охлаждающей воде $\alpha_т$ находится из выражения (3-43). Принимаем, что только один змеевик подключен к водопроводной системе и расход воды равен 2 *л/мин* или $V_в = 33{,}3$ *см³/мин*. Тогда согласно табл. 32 находим $\Delta t_в = 3{,}5°$ С. Принимая перепад температур $t_4 - t_0 = 10°$ С и учитывая, что в данном случае $S = 825$ *см*², находим

$$\alpha_т = \frac{33{,}3 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 3{,}5}{0{,}24 \cdot 825 \cdot 10} = 5{,}9 \cdot 10^{-2} \text{ вт/см}^2 \cdot \text{град}.$$

Для нахождения максимального перегрева конденсатора по отношению к средней температуре охлаждающей воды можно воспользоваться выражением (3-39); некоторые величины, входящие в него, уже известны: $E = 10 \cdot 10^3$ *в/см*, $b_а = 8$ *см* и $\alpha_т = 5{,}9 \cdot 10^{-2}$ *вт/см²·град*. Найдем остальные величины.

Активная проводимость γ_a вычисляется согласно формуле (1-139)

$$\gamma_a = 0,55 \cdot 10^{-12} \cdot 8 \cdot 10^3 \cdot 3,5 \cdot 0,0045 = 0,48 \cdot 10^{-10}\ \text{вт/см}^3.$$

В этой формуле, согласно рис. 114, принято значение $\mathrm{tg}\delta = 0,0045$. Принимая по данным табл. 4 значения $\lambda_б = 0,0017$ *вт/см · град* и $\lambda_ф = 2$ *вт/см · град*, находим, используя формулу (1-133), значение коэффициента теплопроводности секции в направлении, параллельном слоям бумаги и фольги,

$$\lambda_{\parallel} = 0,0017 \cdot \frac{100}{100-16} + 2 \cdot \frac{16}{100-16} = 0,228\ \text{вт/см} \cdot \text{град}.$$

Для нахождения ζ по формуле (3-33) необходимо учесть только тепловое сопротивление по закраине секции, поскольку тепловым сопротивлением слоя фольги, припаянного к трубке, и стенки трубки можно пренебречь. Длина закраины нам известна $\Delta b = 0,75$ *см*; коэффициент теплопроводности вдоль закраины согласно выражению (3-40)

$$\lambda_в = \frac{2 \cdot 0,0017 \cdot 100 + 2 \cdot 16}{2 \cdot 100 + 16} = 0,15\ \text{вт/см} \cdot \text{град};$$

$$\zeta = \frac{0,75}{0,15} = 5,0\ \text{вт}^{-1} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{град}.$$

Искомый перепад температуры по формуле (3-39)

$$t_м - t_0 = 0,48 \cdot 10^{-10} (5 \cdot 10^4)^2\, 8 \left(\frac{8}{2 \cdot 0,228} + 5 + \frac{1}{5,9 \cdot 10^{-2}}\right) = 0,96\,(17,5 + 5 + 17) = 39,5^\circ\,\text{C}.$$

Этот перепад можно считать приемлемым, поскольку при максимальном допускаемом значении температуры $t_м = 70^\circ$ С температура охлаждающей воды t_0 не превышает 30° С. Кроме того, в данном расчете не учитывалась теплоотдача за счет естественного воздушного охлаждения с трех боковых стенок и с крышки конденсатора, которая также дает некоторое снижение температуры перегрева.

Рассчитаем размеры пакета секций конденсатора. С одной широкой стороны пакета припаяна трубка охлаждающего змеевика; принимаем размер трубки 10/7 *мм*; с других сторон пакета проложена изоляция от корпуса. Рабочее напряжение конденсатора относительно низкое (500 *в*), но рассчитать изоляцию от корпуса необходимо на испытательное напряжение, составляющее в данном случае $500 \cdot 7 = 3500$ *в*. Это значение также относительно низкое, а поэтому при

выборе изоляции от корпуса надо ориентироваться на механическую прочность при сборке. Практически можно взять 4 слоя кабельной бумаги по 0,12 *мм*, т. е. общую толщину 0,48 *мм*. При испытательном напряжении 3,5 *кв* получаем напряженность поля порядка 3,5/0, 48 = 7 *кв/мм*, при кратковременной электрической прочности пропитанной кабельной бумаги — не ниже 50 *кв/мм*.

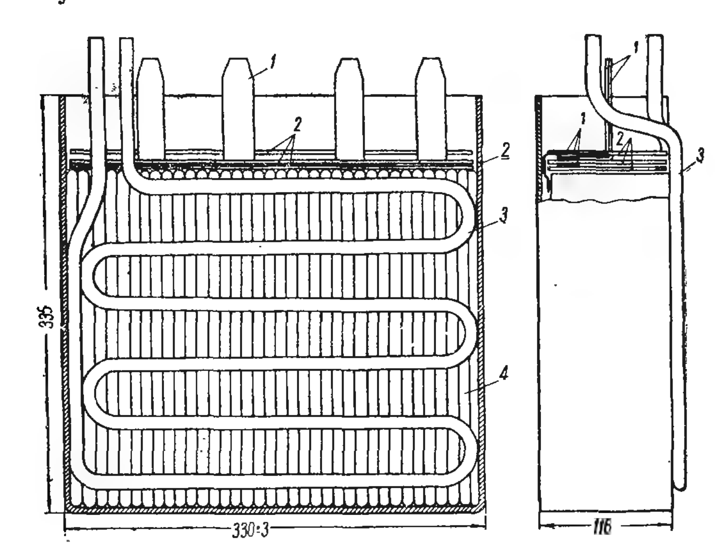


Рис. 118. Пакет секций с припаянным змеевиком:
1 — отводы от групп секций; *2* — изоляция; *3* — змеевик; *4* — секция.

При сборке пакета применяем изоляцию между секциями, которая необходима в связи с применением выступающей фольги; берем по 3 слоя кабельной бумаги 0,12 *мм*, т. е. по 0,36 *мм*; кроме того, берем изоляцию между группами секций в виде прокладок из электрокартона толщиной 1 *мм*.

Размеры пакета: толщина $\Delta_п = 100 + 10 + 0{,}5 = 110{,}5$ *мм*; ширина $B_п = 4 \cdot 9 \cdot 8{,}5 + 2 \cdot 0{,}5 + 3 \cdot 1 + (4 \times 9 - 1)\ 0{,}36 = 322{,}6$ *мм*; высота $H_п = 270{,}5 + 2 \cdot 0{,}48 = 271{,}5$ *мм*.

Внутренние размеры стандартного корпуса конденсатора ЭМВ составляют: толщина 120, ширина 335 и высота 354 *мм*; при этих размерах пакет секций может быть свободно размещен в стандартном корпусе.

Корпус конденсатора (боковые стенки, дно и крышка) изготовляются из латуни Л-62 толщиной 1,5 *мм*. На крышке монтируются четыре выводных фарфоровых металлизированных изолятора, соединенных с выводами от четырех групп секций.

В верхней части выводного изолятора армируется контактный колпачок — цельнотянутая деталь, изготовляемая из прутковой латуни Л-59-1 и луженная припоем ПОС-30 с толщиной слоя 3—6 *мк*.

Собранный пакет секций конденсатора с припаянным к нему змеевиком показан на рис. 118. Размеры пакета увеличены в сравнении с приведенными выше расчетными значениями (110,5 × 322,6 × 271,5 *мм*) за счет необходимости разместить выводы от секций и от групп секций, сборные шинки и плавкие предохранители к отдельным секциям. Схема электрических соединений пакета показана на рис. 119 и общий вид готового конденсатора на рис. 120.

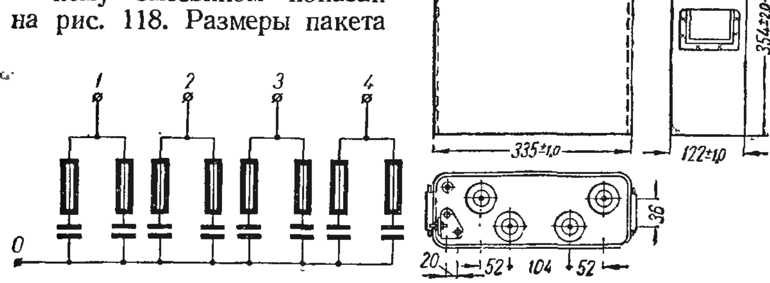


Рис. 119. Схема соединений пакета конденсатора.

Рис. 120. Общий вид конденсатора: 500 *в*, 158 *квар*, частота 8 *кгц*.

§ 17. КОНДЕНСАТОРЫ СВЯЗИ И ОТБОРА МОЩНОСТИ

По высоковольтным линиям одновременно с передачей электрической энергии при промышленной частоте можно передавать высокочастотные сигналы низкого напряжения устройств связи, телемеханики и релейной защиты. Для осуществления передачи необходимо отделить эти устройства от высокого напряжения и обеспечить передачу сигналов на начало высоковольтной линии и прием сигналов

с ее конца. Достигается это включением между линией передачи и устройствами связи, защиты и телемеханики конденсаторов, рассчитанных на работу при полном напряжении линии передачи.

При последовательном соединении нескольких таких конденсаторов может быть осуществлен отбор от линии передачи мощности порядка десятков киловатт и измерение напряжения линии передачи, так как цепочка последовательно включенных конденсаторов представляет собой делитель напряжения и напряжение на ближайшем к земле конденсаторе пропорционально напряжению линии передачи.

Конденсаторы связи и отбора мощности работают в режиме длительного приложения высокого напряжения 50 *гц* и подвергаются действию перенапряжений, возникающих на линии электропередачи. При пробое конденсатора происходит короткое замыкание фазы линии передачи на землю, поэтому к конденсаторам этого типа предъявляется требование особо высокой надежности в работе.

Сухоразрядное и мокроразрядное напряжение внешней изоляции конденсаторов при частоте 50 *гц* и при импульсах должно быть не ниже разрядных напряжений изоляторов класса изоляции, соответствующего рабочему напряжению линии электропередачи, к которой присоединены конденсаторы, т. е. 110, 220, 330, 400 или 500 *кв*. Конденсаторы этого типа устанавливаются на открытом воздухе и рассчитываются на длительную работу в интервале температур от —40 до +35° С. Допускается эпизодическое снижение температуры до — 45 и повышение до +40° С.

Корпуса конденсаторов должны обеспечивать полную герметичность и иметь повышенную механическую прочность — вес отдельных конденсаторов достигает 1000 *кг* (табл. 34), общая высота установки конденсаторов связи и отбора для линий передачи 400 *кв* достигает 5,4 *м* при диаметре 905 *мм*. Такая конструкция подвергается действию значительных ветровых нагрузок, что и определяет повышенные требования к механической прочности корпуса конденсатора.

Устройства связи и защиты работают в диапазоне частот от 50 до 300 *кгц*. Емкость и индуктивность конденсатора являются параметрами цепи высокочастотного сигнала, величина и стабильность которых влияют на режим работы устройств связи и защиты. Индуктивность должна быть

Таблица 34

Основные данные о конденсаторах связи и отбора мощности

Тип	Номинальное напряжение, *кв*	Емкость, *мкф*	Габаритные размеры, *мм*	Вес, *кг*	Удельные характеристики		Назначение
					мкф/кг	*мкф/дм*^{3}	
СМР $133/\sqrt{3}$-0,0186	77	0,0186	⌀ 905 *мм* $H = 1370$	1000	$1{,}86 \cdot 10^{-5}$	$2{,}1 \cdot 10^{-5}$	Установки связи и отбора для линии 400 и 500 *кв*
СМР 55-0,0044	55	0,0044	⌀ 448 $H = 780$	175	$2{,}52 \cdot 10^{-5}$	$3{,}6 \cdot 10^{-5}$	Установки связи и отбора для линий 35, 110, 154, 220, 300 *кв*
ОМР 35-0,0054	35	0,00535	⌀ 905 $H = 836$	1030	$0{,}52 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	Отбор мощности 12 *ква* в комплекте СМР $133/\sqrt{3}$-0,0186
ДМР 70-0,0022	70	0,0044	⌀ 448 $H = 780$	190	$2{,}3 \cdot 10^{-5}$	$3{,}6 \cdot 10^{-5}$	Для емкостных делителей напряжения к трансформаторам НКФ-400

минимальной, так как индуктивное сопротивление возрастает с увеличением частоты. Допуск по номинальному значению емкости для конденсаторов установлен в пределах ±5%, а изменение емкости при изменении температуры от —40 до +35° С не должно превышать 3% от емкости, измеренной при температуре 20 ±5° С.

В пределах частот от 50 *гц* до 300 *кгц* допускается изменение емкости конденсаторов связи и отбора не более чем на 6% по отношению к емкости, измеренной при частоте 50 *гц*.

Для конденсаторов, предназначенных к применению в делителях напряжения, при изменении температуры колебания емкости ограничены пределами ±1,0%.

При частоте 50 *гц* величина тангенса угла диэлектрических потерь отдельных конденсаторов не должна быть выше 0,004, причем это значение не должно превышаться при подъеме напряжения до 1,5 $U_н$ и при повышении температуры до 60° С.

В табл. 34 приведены основные данные о выпускаемых конденсаторах связи и отбора мощности.

Конструкция и расчет конденсатора связи СМР 55-0, 0044

Исходные данные. Номинальное напряжение $U_н = 55$ *кв*, одноминутное испытательное напряжение при частоте 50 *гц* $U_{исп} = 160$ *кв*, пробивное напряжение — не ниже 255 *кв*. Сухоразрядное напряжение внешней изоляции при 50 *гц* не должно быть ниже 170 *кв*, мокроразрядное — 120 *кв*.

Импульсное испытательное напряжение (полная волна) для класса изоляции 110 *кв*, при двух последовательно включенных конденсаторах 530 *кв макс*, при испытании срезанной волной длительностью 3 *мксек* обеих полярностей 690 *кв макс*.

Емкость конденсатора — 0,0044 ± 5% *мкф*.

Конденсатор предназначен для работы в интервале температур от —40 до +40° С при высоте установки не более 1000 *м* над уровнем моря.

Выбор величины рабочей напряженности поля в диэлектрике, числа и размеров секций. Учитывая требование повышенной надежности конденсаторов связи, а также их длительный режим работы при частоте 50 *гц*, рабочую напря-

женность для диэлектрика из пропитанной маслом конденсаторной бумаги выбираем в пределах 7—9 *кв/мм*. Так как конденсатор работает при переменном напряжении и должен обладать малыми потерями, то целесообразно применять бумагу КОН-1 с пониженной плотностью. Толщина диэлектрика в соответствии с требованиями получения максимальной кратковременной электрической прочности и повышенного значения начальной напряженности ионизации выбрана равной 70 *мк* (7 листов бумаги толщиной 10 *мк*).

При выбранном значении напряженности и толщине диэлектрика напряжение на последовательной группе

$$U_г = E_р d = 9 \cdot 7 \cdot 0{,}01 = 0{,}63 \text{ кв}.$$

Число последовательно соединенных групп

$$N = \frac{U_и}{U_г} = \frac{55}{0{,}63} = 87.$$

Кратковременная электрическая прочность по данным кривой *4* (см. рис. 81) для толщины 70 *мк* при переменном напряжении равна $120 : \sqrt{2} = 85$ *кв/мм*, а начальная напряженность ионизации согласно уравнению (3-19)

$$\lg E_н = 2{,}65 - 0{,}5 \lg 70 = 1{,}73; \text{ откуда } E_и = 54 \text{ кв/мм}.$$

При $E_р = 9$ *кв/мм* получаем запас по кратковременной электрической прочности

$$k_з = \frac{85}{9} = 9{,}45,$$

и по напряженности ионизации

$$k_з = \frac{54}{9} = 6{,}0.$$

Пробивное напряжение всего конденсатора

$$U_{пр} = k_з U_г N = 9{,}45 \cdot 0{,}63 \cdot 87 = 520 \text{ кв},$$

что превышает заданное в исходных данных испытательное импульсное напряжение конденсатора в два раза.

Емкость последовательно соединенной группы

$$C_г = CN = 0{,}0044 \cdot 87 = 0{,}385 \text{ мкф}.$$

При таком значении емкости нет необходимости применять параллельное соединение нескольких секций в группе,

и конденсатор может быть выполнен из 87 последовательно соединенных секций.

При диаметре оправки $D_0 = 127$ *мм*, ширине бумаги 140 *мм*, ширине фольги 120 *мм*, коэффициенте запрессовки 0,95 секция емкостью 0,385 *мкф* имеет 12 витков и размеры 140 × × 208 × 4,8 *мм*.

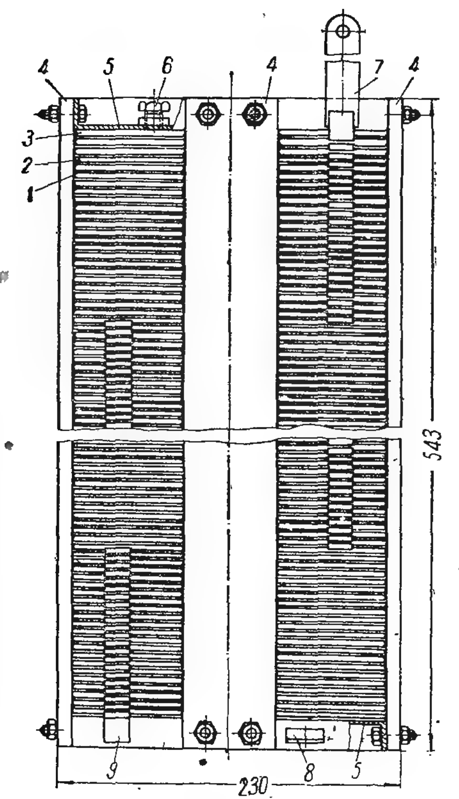


Рис. 121. Пакет конденсатора СМР 55-0,0044.

Конструкция пакета. Пакет (рис. 121) собирается между двумя корытообразными щеками *5* и стягивается четырьмя гетинаксовыми планками *4*. Между секциями *2* укладываются прокладки из двух листов кабельной бумаги *1*. Для подгонки емкости пакета под верхней щекой устанавливается стальная пластинка *3*, а в плоскую часть верхней щеки завинчены четыре болта *6*, упирающиеся в стальную плиту. В таком устройстве можно менять степень прессовки всего пакета и получать нужное значение емкости.

К нижней щеке приварены два уголка *8*, при помощи которых пакет болтами прикрепляется к нижней крышке. При помощи отводов *9* и *7* крайние секции пакета соединяются со щеками, крышкой и дном конденсатора.

Конструкция конденсатора. Разрез конденсатора показан на рис. 122. Пакет конденсатора *4* помещен в фарфоровом цилиндре *5* и закрыт верхней *6* и нижней *10* крышками. Крышки соединены с цилиндром болтами *9* при помощи упорных полуколец *2* и колец *3*. Между крышками

и торцами цилиндра, а также между полукольцами и выступами цилиндра установлены прокладки из маслостойкой резины *1*.

Значительное место во внутренней полости конденсатора занимает расширитель *8* для компенсации давления масла. Расширитель представляет собой набор из 7—9 мембранных стальных коробок.

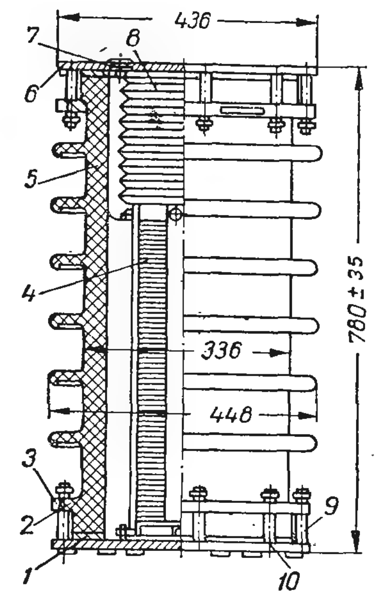


Рис. 122. Разрез конденсатора СМР 55-0,0044.

Коробки изготовляются из двух сваренных герметично штампованных тарельчатых мембран. При изменении объема масла объем коробок меняется, благодаря чему внутренняя полость конденсатора полностью заполнена маслом при расчетных колебаниях температуры.

После окончательной сборки в конденсатор накачивается масло с таким расчетом, чтобы внутри поддерживалось избыточное давление, доходящее до 1,4 *атм* при 65° С и равное нулю при температуре—45° С. Через отверстие, закрытое винтом *7*, можно доливать масло. Конструкция с избыточным давлением масла полностью исключает засасывание воздуха в конденсатор, хотя необходима более тщательная герметизация конденсатора. Избыточное давление масла повышает также начальную напряженность ионизации в диэлектрике.

Электрическая прочность корпуса конденсатора. Высота изоляционного фарфорового цилиндра выбирается по испытательному напряжению конденсатора. Разрядное расстояние h по поверхности цилиндра между концами болтов верхней и нижней крышки равно 600 *мм*.

Для маслонаполненных изоляторов на напряжения 110—400 *кв* обычно принимаются следующие значения средних разрядных напряженностей: сухоразрядные напряженности при 50 *гц* $E_{\text{схр}} = 4{,}3 \div 3{,}3$ *кв действ/см*, мокрораз-

рядные напряженности при 50 *гц* $E_{мкр} = 2{,}6 \div 2{,}3$ *кв действ/см*; импульсные напряженности при положительной полярности: минимальные $E'_{имп} = 7{,}0 \div 5{,}6$ *кв макс/см*, при времени разряда 2 *мксек* $E''_{имп} = 11 \div 9{,}4$ *кв макс/см*.

Большие цифры относятся к изоляторам на 110 *кв*, а меньшие — к изоляторам на 400 *кв*.

При расстоянии $h \doteq 60$ *см*:

$$U_{схр} = E_{схр}h = 4{,}3 \cdot 60 = 268 \text{ кв действ};$$

$$U_{мкр} = E_{мкр}h = 2{,}6 \cdot 60 = 156 \text{ кв действ}.$$

Для полной волны $U'_{имп} = E'_{имп}h = 7 \cdot 60 = 420$ *кв макс*.
Для срезанной волны $U''_{имп} = E''_{имп}h = 11 \cdot 60 = 660$ *кв макс*.

Из сравнения полученных значений с заданными для конденсатора СМР 55-0,0044 видно, что внешняя изоляция конденсатора обладает достаточным запасом по электрической прочности.

§ 18. ИМПУЛЬСНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Импульсные конденсаторы работают как накопители энергии: в течение сравнительно большого промежутка времени они заряжаются от источника питания небольшой мощности, после чего разряжаются (колебательный или апериодический разряд) в короткий промежуток времени с выделением большого количества энергии.

В последние десятилетия широко развивается импульсная техника, для которой необходимо создание импульсных конденсаторов различного назначения.

Импульсные конденсаторы применяются:

а) в схемах генераторов импульсов напряжения;

б) в схемах генераторов импульсов тока;

в) для делителей напряжения;

г) в мощных радиолокационных установках;

д) для формирующих линий, создающих импульсы различной формы, длительности и энергии;

е) для создания мощных импульсных источников света;

ж) в установках для исследования управляемых термоядерных реакций;

з) в электротехнологических установках для сварки, искровой и магнитоимпульсной обработки металлов, электрогидравлического эффекта.

В связи с широким применением импульсных конденсаторов и разнообразными условиями их работы потребова-

лось создание различных конструктивных форм конденсаторов, рассчитанных на напряжения от 500 *в* до 500 *кв*, имеющих емкость от сотен микрофарад до десятков пикофарад и различную запасаемую энергию

$$W = \frac{CU^2}{2}\ дж, \tag{3-48}$$

где C — в *ф*, а U — в *в*.

Наряду с емкостью и рабочим напряжением величина запасаемой энергии является основным параметром для большинства импульсных конденсаторов; при конструировании конденсаторов этого типа стремятся получить возможно бóльшую величину данного параметра.

Так как величина запасаемой энергии определяет расход активного диэлектрика, то размеры и вес импульсных конденсаторов, как правило, превышают размеры и вес других типов конденсаторов. Вес некоторых импульсных конденсаторов достигает 2000 *кг*.

К импульсным конденсаторам, как и к другим типам конденсаторов, предъявляется требование высокой надежности в работе. Помимо необходимости обеспечить работу ответственных установок, имеет значение и экономический фактор. Ввиду большого объема и веса большинства типов импульсных конденсаторов выход из строя сопряжен с потерей большого количества дорогостоящих активных материалов конденсатора.

Во время разряда конденсатора через его соединения и выводы проходят большие токи, при этом возникают значительные динамические усилия; поэтому надежность импульсных конденсаторов определяется не только запасами по электрической прочности диэлектрика, но и механической и термической стойкостью выводов и соединений. Так как в импульсных конденсаторах накапливается значительный запас энергии, то при пробое секции конденсатора внутри бака выделяется энергия поврежденного конденсатора, а часто и включенных параллельно с ним других мощных конденсаторов. В этом случае внутри бака возникает электрогидравлический эффект, который при недостаточной прочности корпуса конденсатора приводит к взрыву. В практике эксплуатации импульсных конденсаторов известны случаи, когда такие взрывы вызывали тяжелые последствия и для обслуживающего персонала, и для дорогостоящего лабораторного оборудования.

К конденсаторам, работающим в схемах генераторов импульсных токов, формирующих линий, накопителей энергии для физических исследований, предъявляется требование минимального индуктивного сопротивления.

При разряде конденсатора как апериодическом, так и колебательном ток изменяется с большой скоростью, что эквивалентно большой частоте. Следовательно, даже малая индуктивность самого конденсатора вызывает большое индуктивное сопротивление ωL, что сказывается и на величине разрядного тока, и на форме импульса.

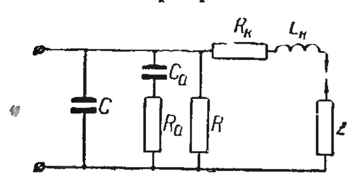


Рис. 123. Схема замещения конденсатора с абсорбцией.

Для ряда установок форма импульса задана, причем часто необходима форма импульса, близкая к прямоугольной, что также требует обеспечения минимальной индуктивности конденсатора.

Импульсный конденсатор представляет собой энергетическое устройство, поэтому к нему предъявляется требование максимальной отдачи энергии потребителю и минимальных потерь в самом конденсаторе. Потери энергии при разряде происходят прежде всего в обкладках, соединениях и выводах конденсатора. Следовательно, материал и размеры их должны быть так рассчитаны, чтобы эти потери были минимальными. Кроме этого, необходимо считаться с явлением абсорбции в диэлектрике, вызывающим неполную отдачу энергии при разряде конденсатора. Это явление мало учитывается при конструировании и оценке качества работы импульсного конденсатора, поэтому рассмотрим его подробнее.

Схема замещения конденсатора представлена на рис. 123, где C — геометрическая емкость конденсатора и емкость быстро протекающих процессов поляризации (электронная, ионная поляризация), $C_а$ — емкость медленно протекающих процессов поляризации (высоковольтная, дипольная поляризация); замедленное протекание этих процессов характеризуется введением в схему замещения фиктивного сопротивления $R_а$; величины $R_к$ и $L_к$ — активное сопротивление и индуктивность обкладок, соединений и выводов конденсатора; R — сопротивление изоляции; Z — сопротивление нагрузки, в которое в общем случае могут входить активное сопротивление, индуктивность и емкость.

К быстро протекающим процессам поляризации в данном случае относятся виды поляризации, у которых скорость установления (время релаксации) меньше заданного времени разряда конденсатора, а к медленно протекающим — те виды, у которых скорость установления поляризации больше заданного времени разряда конденсатора.

У импульсного конденсатора, разряжающегося через искровой промежуток, разряд начинается, когда напряжение на искровом промежутке достигнет пробивного значения, и заканчивается, когда напряжение в процессе разряда снизится до значения, при котором дуга в искровом промежутке гаснет.

При пробое искрового промежутка заряженный конденсатор замыкается на нагрузку и через нее протекает два тока (от разряда емкостей C и $C_а$), имеющие различную скорость спадания.

При этом благодаря значительной величине $R_а$ скорость разряда $C_а$ будет меньше, чем C, и емкость $C_а$ не успеет полностью разрядиться при кратковременном разряде.

Так как $R \gg Z$, то влиянием R на разряд конденсатора в импульсном режиме можно пренебречь.

После прекращения разряда через искровой промежуток остаточный заряд на емкости $C_а$ перераспределится между емкостями C и $C_а$, на выводах конденсатора появится некоторое остаточное напряжение $U_{ост}$, величина которого во времени будет нарастать, проходить через максимум и затем снижаться вследствие разряда емкостей C и $C_а$ на R.

Отношение

$$k_{отд} = \frac{W_{полн} - W_{ост}}{W_{полн}} 100\% \qquad (3\text{-}49)$$

можно рассматривать как коэффициент отдачи энергии конденсатора в импульсном режиме.

Принимая

$$W_{полн} = \frac{U_{зар}^2 C_н}{2},$$

$$W_{ост} = \frac{U_{ост}^2 C_н}{2};$$

получаем

$$k_{отд} = \left(1 - \frac{U_{зар}^2}{U_{ост}^2}\right) 100\%, \qquad (3\text{-}50)$$

где $U_{зар}$ — зарядное напряжение конденсатора;

$U_{ост}$ — максимальное значение остаточного напряжения после разряда конденсатора накоротко.

У различных типов конденсаторов отношение $\frac{U_{ост}}{U_{зар}}$ колеблется в пределах от 3 до 15%, следовательно, коэффициент отдачи энергии колеблется в пределах от 91 до 77,5%.

В настоящее время накоплено сравнительно мало экспериментальных и расчетных данных о влиянии различных факторов на явление абсорбции, что затрудняет разработку рекомендаций по созданию импульсного конденсатора с максимальной отдачей энергии.

Необходимо экспериментально определять коэффициент потерь энергии в каждом новом образце импульсного конденсатора.

Конструктору импульсного конденсатора необходимо четко представить, что емкость конденсатора, рассчитанная по значению диэлектрической проницаемости, измеренной при частоте 50 *гц* или при постоянном напряжении, может значительно превышать фактическую емкость конденсатора при импульсном разряде.

Так как импульсные конденсаторы предназначены для работы при высоких напряжениях, то их приходится изготовлять с большим числом последовательных секций. Для надежной работы конденсатора необходимо, чтобы емкость и сопротивление последовательных секций были одинаковыми.

При медленном заряде конденсатора напряжение между последовательно соединенными секциями распределяется прямо пропорционально их активным (точнее полным) сопротивлениям. Неравенство сопротивлений отдельных секций приводит к появлению напряжений, превышающих номинальное у секций с повышенным сопротивлением, вследствие чего может произойти пробой.

В режиме колебательного разряда напряжение перераспределяется обратно пропорционально значениям емкостей отдельных секций.

При разряде конденсаторов в схемах генераторов импульсных напряжений при неравенстве емкостей отдельных конденсаторов, помимо появления перенапряжений у секций конденсаторов с меньшей емкостью, происходит перераспределение зарядов между отдельными конденсаторами и неполная отдача их энергии нагрузке. Такой же процесс происходит и в каждом отдельном конденсаторе, имеющем последовательные секции или группы с различной емкостью.

В режиме зарядки импульсный конденсатор находится под воздействием выпрямленного напряжения, содержащего небольшую переменную составляющую. В начале зарядки напряжение возрастает, а затем некоторое время переменная составляющая — постоянна. В режиме разряда конденсатор замыкается на малое сопротивление и в зависимости от соотношения параметров этого сопротивления и параметров конденсатора форма разряда может быть или апериодической или периодической (колебательный разряд).

В генераторах импульсных напряжений, предназначенных для испытания и исследования изоляции, между циклами заряд — разряд происходят бóльшие или меньшие перерывы. В установках, предназначенных для исследования коммутирующей способности аппаратуры (например, колебательный контур проф. А. А. Горева), и в схемах формирующих линий, а также устройствах, использующих конденсаторы для физических исследований, циклы заряд — разряд могут следовать друг за другом непрерывно, но все же обычно такой режим длится лишь несколько часов, после чего следует длительный перерыв, в течение которого температура конденсатора может снижаться. Кроме того, конденсаторы для импульсных схем имеют большую поверхность охлаждения. Все это приводит к тому, что большей частью температура на поверхности конденсатора превышает температуру окружающей среды не более чем на 5—10°.

В связи с этим основное значение в процессах разрушения диэлектрика у большинства рассматриваемых типов конденсаторов имеет непосредственное действие электрического поля и вызываемые им ионизационные, а не тепловые процессы.

В соответствии с режимами работы импульсного конденсатора можно рассматривать для его диэлектрика:

а) электрическую прочность при медленном подъеме напряжения;

б) электрическую прочность при длительном действии постоянного напряжения;

в) электрическую прочность в режиме разряда.

Наиболее легким для работы диэлектрика является режим подъема напряжения, когда напряженность поля меньше напряженности при нормальном напряжении конденсатора, которое достигается лишь в конце зарядки.

После окончания зарядки на диэлектрик конденсатора кратковременно действует выпрямленное напряжение, постоянное по величине, при котором ионизационные процессы либо вообще отсутствуют, либо происходят в виде отдельных вспышек с интервалами в несколько секунд или даже минут. Наиболее тяжелым для работы диэлектрика является режим разряда конденсатора. Диэлектрик оказывается под действием напряжения, меняющегося с большой скоростью $\frac{dU}{dt}$ как при апериодическом, так и при колебательном разряде.



Рис. 124. Ионизация у края конденсаторной секции.

При частоте 50 *гц* начальная напряженность ионизации в зависимости от толщины диэлектрика лежит в пределах 40—70 *кв/мм* и снижается после действия перенапряжений до 5—15 *кв/мм*.

Рабочая напряженность для импульсных конденсаторов колеблется в пределах 45—100 *кв/мм*, следовательно, в режиме разряда, когда диэлектрик конденсатора находится под действием переменного напряжения, рабочая напряженность оказывается выше, чем начальная напряженность возникновения ионизации.

Скорость изменения напряжения $\frac{dU}{dt}$ при разряде конденсатора выше максимальной скорости изменения напряжения при частоте 50 *гц*, следовательно, можно считать, что в момент разряда диэлектрик работает при высокой частоте. С ростом частоты начальная напряженность ионизации снижается, поэтому различие между рабочей напряженностью и начальной напряженностью ионизации дополнительно возрастает. Появление ионизации в момент разряда при рабочих напряженностях легко проверяется экспериментально.

На рис. 124 показано возникновение интенсивной ионизации в момент разряда секции импульсного конденсатора,

помещенной в прозрачные зажимные пластины и прозрачный бак с маслом. На секцию, собранную из 15 листов бумаги толщиной 15 *мк*, подавалось разрядное напряжение 26 *кв*.

После первых вспышек ионизации масло у края секции разлагается и последующие разряды проходят уже в среде газа, что вызывает снижение напряжения ионизации (рис. 125).

Зависимость напряжения ионизации от числа разрядов накоротко, приведенная на рис. 125, была определена для секции, состоящей из 12 листов бумаги толщиной 15 *мк*. Напряжение ионизации измерялось при частоте 50 *гц* после 10 циклов заряда до напряжения 20 *кв* и разряда накоротко. Количество газа, выделившегося в единицу времени, зависит от сорта масла, от степени его дегазации, давления внутри секции, напряженности поля и параметров разрядного контура, определяющих скорость изменения напряжения при разряде.

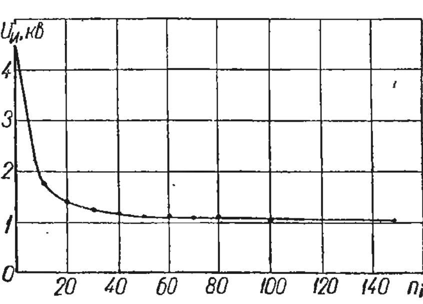


Рис. 125. Кривая зависимости начального напряжения ионизации от числа разрядов конденсатора накоротко.

При заданном напряжении увеличение активного сопротивления нагрузки сопровождается уменьшением интенсивности вспышек ионизации и газообразования, а увеличение индуктивности вызывает рост интенсивности ионизации и более активное газообразование. После прекращения разрядов накоротко газовая полость, образовавшаяся у края секции, постепенно, за несколько десятков часов, рассасывается и напряжение ионизации восстанавливается до начального значения.

Под действием вспышек ионизации масло разлагается на твердые продукты, так называемый *X*-воск, и газ, содержащий 60—67% водорода, до 9% кислорода и до 9% метана. Вследствие большого процентного содержания водорода напряжение ионизации у этой смеси газов ниже, чем у воздуха. Когда объем газа у края секции достигает определенного критического значения, то искровой разряд, идущий от края секции, вызывает взрыв газовой смеси.

Гипотеза о микровзрывах у края секции подтверждается фотографией (рис. 126), на которой показан край секции, выдержавшей несколько тысяч циклов заряд — разряд накоротко.

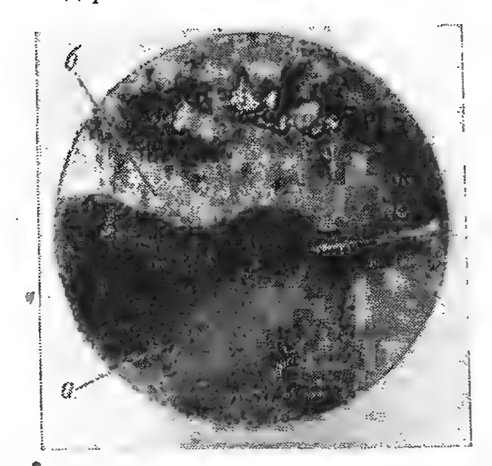


Рис. 126. Разрушение диэлектрика и фольги у края электрода.

На фотографии видно, что на краю фольги (*а*) образовались концентрические складки (*б*) — характерные следы взрывной волны.

Под влиянием микровзрывов и локальных высоких температур электронных и ионных лавин, образующихся при ионизационном разряде, бумага постепенно разрушается. Разрушение начинается на листе, прилегающем

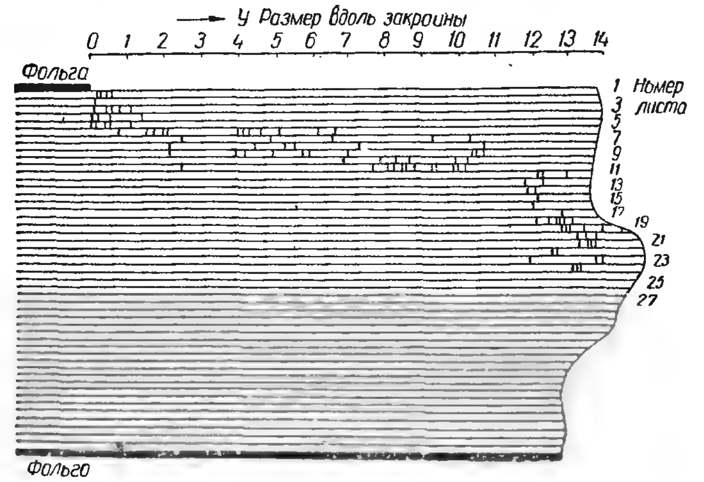


Рис. 127. Развитие разрушения диэлектрика при воздействии серии импульсов.

к фольге, и распространяется от листа к листу в направлении второго электрода. Ход разрушения показан на рис 127,

где изображена секция, состоящая из 48 листов конденсаторной бумаги, которая выдержала 200 разрядов накоротко при напряжении 50 *кв*. Секция не была доведена до пробоя и разобрана.

На рис. 127 вертикальными линиями отмечены сквозные отверстия, образовавшиеся в отдельных листах бумаги. По этим отверстиям легко проследить путь разрушения диэлектрика секции — он начинается у верхнего электрода и постепенно, по науглероженным разрушенным местам, проходит к нижнему электроду. Полный пробой наступает раньше, чем местные разрушения достигнут второго электрода. Появление разрушений в отдельных листах и их распространение от листа к листу эквивалентно уменьшению толщины диэлектрика. При уменьшении толщины при рабочем напряжении напряженность поля достигает пробивных значений. Пробой обычно завершается во время разряда конденсатора.

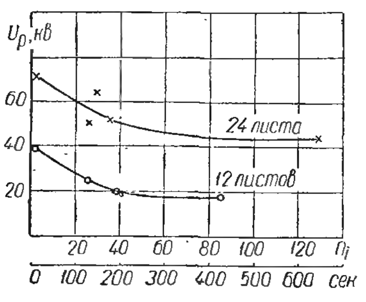


Рис. 128. Кривая зависимости напряжения, разрушающего диэлектрик, от числа циклов заряд — разряд; длительность цикла 5 *сек*.

Обычно описанный процесс разрушения начинается от края обкладки — места наибольшей напряженности поля. Однако аналогичный процесс может происходить и под обкладками, если там встречаются ослабленные по электрической прочности места, газовые включения и в особенности проводящие частицы, вызывающие местное увеличение напряженности поля.

Процесс разрушения диэлектрика в импульсном режиме носит кумулятивный характер, и поэтому срок жизни диэлектрика определяется числом импульсов и напряжением зарядки конденсатора.

На рис. 128 показана кривая зависимости напряжения, разрушающего диэлектрик, от числа циклов заряд — разряд для двух различных толщин секций. Из этого рисунка и из рассмотрения процесса разрушения диэлектрика в импульсном режиме следует, что работа импульсного конденсатора до выхода из строя должна быть рассчитана на определенное количество циклов заряд — разряд при опреде-

ленной напряженности поля, определяемой по зарядному напряжению и толщине диэлектрика.

Для конденсаторов, применяемых в генераторах импульсных напряжений и токов, работающих с интервалами между циклами заряд — разряд в несколько минут или несколько десятков минут, принята расчетная напряженность поля 45—60 *кв/мм* при гарантированном для основной массы конденсаторов (не менее 95%) сроке службы в 10 000 циклов заряд — разряд при номинальном напряжении. Средний срок службы таких конденсаторов — порядка 50 000 циклов заряд — разряд. При сокращении срока службы конденсатора до 1000 циклов заряд — разряд расчетная рабочая напряженность может быть повышена до 70—100 *кв/мм*, что позволяет существенно уменьшить габаритные размеры, вес и стоимость конденсатора.

Для конденсаторов, работающих с числом импульсов порядка пятидесяти в секунду (в таком режиме могут работать формирующие линии), рабочую напряженность необходимо резко снижать и принимать примерно такой, как у конденсаторов, работающих непрерывно при частоте 50 *гц*, т. е. 10—12 *кв/мм*. Зависимость срока жизни конденсатора от рабочей напряженности может быть представлена в следующем виде:

$$\left(\frac{E_1}{E_2}\right)^n = \frac{\tau_2}{\tau_1}, \qquad (3\text{-}51)$$

где E_1 — рабочая напряженность при сроке службы τ_1;
E_2 — рабочая напряженность при сроке службы τ_2:
n — экспериментально определяемый коэффициент; для постоянного напряжения $n = 16$, для переменного напряжения ($f = 50$ *гц*) $n = 10$.

Конструкция импульсных конденсаторов

Импульсные конденсаторы изготовляются в следующих конструктивных вариантах:

а) в металлическом корпусе с горизонтальным или вертикальным расположением изолятора;

б) в корпусе из изоляционного материала, цилиндрическом или прямоугольном.

Для конденсаторов с цилиндрическим корпусом из изоляционного материала проходные изоляторы для изолирования выводов конденсатора от корпуса не требуются —

оба вывода конденсатора присоединяются к торцовым металлическим крышкам. Размер по высоте конденсатора при этом значительно сокращается. Для конденсаторов на напряжение свыше 150 *кв* такая конструкция является единственно возможной, так как проходные изоляторы на такие напряжения имеют очень большие размеры (не менее 1 *м* по высоте), сложную конструкцию и высокую стоимость. У конденсаторов в изоляционном корпусе пакет от корпуса не изолируется.

Вместе с тем конструкция с цилиндрическим изоляционным корпусом имеет и недостатки — стенки корпуса не эластичны и в конденсаторе необходимо предусматривать специальные устройства для компенсации температурного расширения масла, если он рассчитан на работу при широком диапазоне изменения температуры.

Кроме того, горизонтальное сечение пакета конденсатора имеет обычно прямоугольную форму, а сечение корпуса — круглую форму. Между пакетом и стенками корпуса образуются пространства, которые не могут быть заполнены активным диэлектриком, что ухудшает удельные характеристики конденсатора. К недостаткам этой конструкции следует отнести и более тяжелый температурный режим, так как теплопроводность стенок корпуса из изолирующего материала меньше теплопроводности металлических стенок.

В импульсных конденсаторах встречаются все виды секций: плоская ручной сборки, намотанная цилиндрическая и намотанная плоскопрессованная.

Рассмотрим отдельные типы конструкций импульсных конденсаторов.

Конденсатор ИМ-100-1,0 собран из 414 стандартных плоскопрессованных намотанных секций размером 280 × × 131 × 10,3 *мм*. В секциях использована конденсаторная бумага КОН-2 толщиной 12 *мк*. Рабочая напряженность в диэлектрике 45,3 *кв*. Конденсатор собран из 9 параллельно соединенных колонок, каждая из которых состоит из 46 последовательно соединенных секций. В каждой колонке секции размещены между двумя металлическими щеками и стянуты текстолитовыми планками. Высоковольтный вывод взят из середины каждой колонки (рис. 129) между 23 и 24 секцией, что упрощает конструкцию и уменьшает расход материалов на изоляцию от корпуса.

У конденсатора ИМ-100-1,0 верхняя крышка бака изготовлена из текстолита толщиной 20 *мм*, что позволило отка-

заться от высоковольтного проходного изолятора на 100 *кв* и ограничиться установкой изолятора на 6 *кв*.

Размеры конденсатора (без изолятора и выступающих частей крышки) 1065 × 506 × 490 *мм*. Удельная энергия

$$W_{уд} = \frac{CU^2}{2V} = \frac{1{,}0 \cdot 100^2}{2 \cdot 10{,}65 \cdot 5{,}96 \cdot 4{,}9} = 16{,}1\ дж/дм^3.$$

Особенно компактной с высокими удельными характеристиками является конструкция конденсатора в прямоугольном корпусе из изоляционного материала — листового винипласта толщиной 3—8 *мм*.

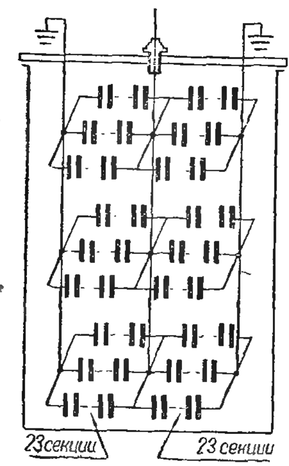


Рис. 129. Схема соединений конденсатора ИМ-100-1,0.

В нагретом состоянии листам из винипласта легко придать необходимую для корпуса конденсатора форму. Отдельные детали корпуса легко свариваются нагретым до 250—270° С воздухом. При надлежащем качестве сварки швы получаются герметичными, их механическая прочность не ниже прочности целого листа винипласта. Однако прочность самого винипласта сравнительно невысока ($\sigma_р = 400 \div 500$ *кГ/см²*), винипласт не стоек к действию ударной нагрузки.

У конденсаторов с корпусами из винипласта необходимо особенно тщательно рассчитывать механическую прочность корпуса при температурном расширении масла. Рационально предусматривать в конструкции конденсатора эластичные компенсаторы давления масла, изготовленные из полихлорвинилового пластиката или трубок, благодаря которым давление внутри бака при колебаниях температуры масла не превышает атмосферного.

На рис. 130 показан импульсный конденсатор в винипластовом корпусе КИМ-1 50 *кв*, 0,2 *мкф*, разработанный в ХПИ им. В. И. Ленина. Характерной особенностью этого конденсатора является специальная система литых прижимных выводов, использование которых позволило довести гарантированный срок службы конденсатора до 10 000 циклов заряд — разряд при разряде конденсатора накоротко.

Конденсатор обладает малой индуктивностью, порядка 60 *см*, габаритные размеры конденсатора $200 \times 265 \times 370$ *мм*, вес 30 *кг*. Рабочая напряженность поля в диэлектрике составляет 50 *кв/мм*, удельная энергия — 15 *дж/дм*³.

Конденсатор ИМ-300-0,35 является одним из самых крупных по величине запасаемой энергии (16 200 *дж*), весу и размерам. Конденсатор предназначен для работы в схеме генератора импульсных напряжений в режиме заряд — разряд на сопротивление не менее 50 *ом*, с частотой следования импульсов через одну минуту. В этом режиме конденсатор должен выдерживать, не разрушаясь, не менее 10 000 циклов заряд — разряд. Номинальное напряжение конденсатора 300 *кв*, испытательное 360 *кв* постоянного тока в течение 5 *мин*. Емкость конденсатора 0,36 *мкф* +10%, индуктивность должна быть минимальной.

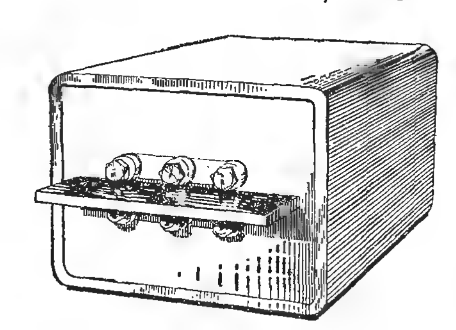


Рис. 130. Конденсатор КИМ-1 в винипластовом корпусе.

Конденсатор предназначен для работы в закрытом помещении при колебаниях температуры от 0 до 35° С. В этих пределах должна быть обеспечена герметичность и компенсация температурного расширения масла.

Учитывая сравнительно легкий режим работы конденсатора в схеме генератора импульсов, отсутствие разрядов накоротко, срок службы, ограниченный 10 000 циклами заряд — разряд (большая часть которых проводится при напряжении меньшем, чем номинальное), рабочая напряженность выбирается равной 52 *кв/мм*.

Для намотки секций применена бумага КОН-2 с плотностью 1,2 *г/см*³. Толщина диэлектрика должна быть выбрана в пределах оптимума кривой $E_{пр} = f(d)$, т. е. порядка 80—100 *мк*. При толщине бумаги 12 *мк* число листов между обкладками равно 8 и расчетная толщина диэлектрика равна 96 *мк*.

При расчетной напряженности 52 *кв/мм* напряжение на секции $U_c = E_p d = 52 \cdot 0{,}096 = 5$ *кв*.

Число последовательных групп в конденсаторе

$$N = \frac{U_н}{U_с} = \frac{300}{5} = 60,$$

емкость последовательной группы

$$C_г = CN = 0{,}36 \cdot 60 = 21{,}6 \text{ мкф}.$$

Для напряжения $U_c = 5$ *кв* и толщины диэлектрика 96 *мк* при использовании бумаги шириной 280 *мм* и фольги шириной 260 *мм* технологически удобно изготовить секцию емкостью около 2 *мкф*, следовательно, последовательная группа должна состоять из 12 параллельно соединенных секций емкостью 1,8 *мкф*. При диаметре оправки 83 *мм* и 31 витке такая секция имеет размеры 280 × 146 × 12,82 *мм*.

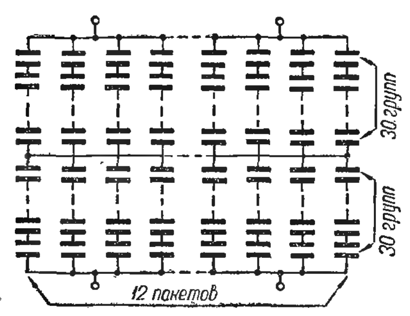


Рис. 131. Схема конденсатора ИМ-300-0,35.

Всего секций в конденсаторе

$$MN = 12 \cdot 60 = 720.$$

Целесообразно это количество секций собрать в 24 пакетах, расположенных в два этажа.

Распределение секций по пакетам, помимо удобства сборки, позволяет лучше заполнить цилиндрическое пространство корпуса конденсатора. Схема и общий вид конденсатора показаны на рис. 131 и 132.

Каждый пакет *1* собирается между двумя щеками *14*, соединенными четырьмя текстолитовыми планками *4* размером 4 × 10 × 492 *мм*. Секции изолированы от щек защитными прокладками из электрокартона, между секциями уложены прокладки из кабельной бумаги. Через каждые шесть секций проложены обертки из кабельной бумаги, защищающие боковые стороны секций. При помощи перемычек *8* из медной ленты верхняя и нижняя секции соединены со щеками. Стальными косынками, уголками и планками *3* отдельные пакеты соединяются один с другим, образуя выемную часть конденсатора. Выемная часть помещается в изоляционный цилиндр *2* из фарфора или гетинакса, имеющий верхнюю крышку *7* и днище *15*.

Для присоединения пакетов внутри на крышках имеются шпильки с гайками *9*, а на выемной части — отводы из медной ленты *10*. Для уменьшения индуктивности конденсатора пакет к крышкам присоединяется в нескольких точках.

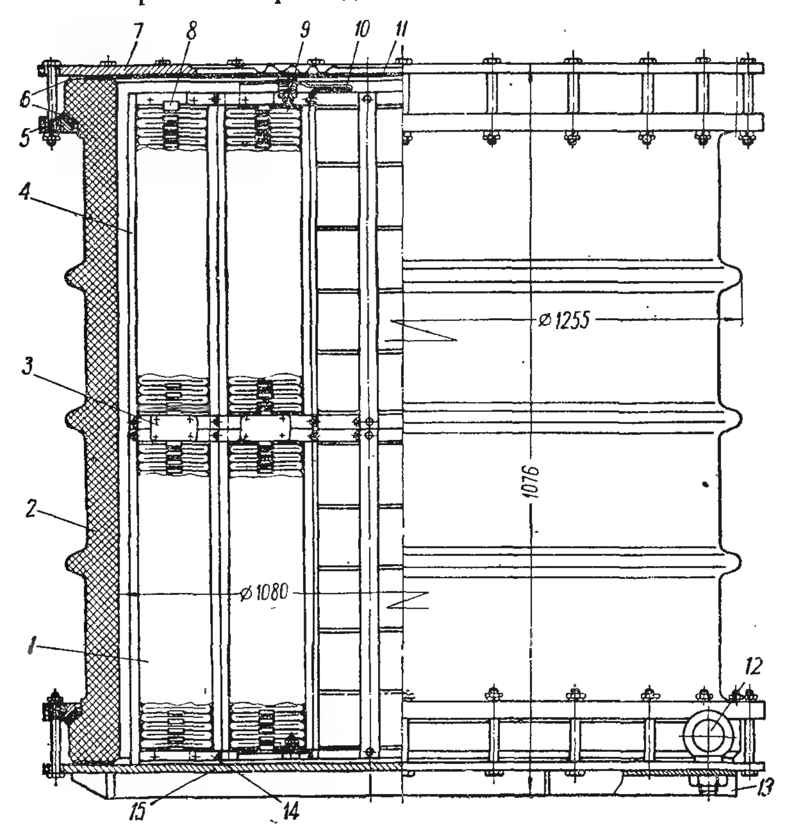


Рис. 132. Общий вид конденсатора ИМ-300-0,35 (пояснения в тексте).

Верхняя крышка имеет упругую мембрану *11*, служащую для компенсации расширения масла. Крышки скрепляются с корпусом болтовым соединением при помощи стального сплошного кольца *5*, упирающегося в выступ фарфорового цилиндра. Между кольцом и выступом цилиндра, а также между торцом цилиндра и крышкой устанавливаются прокладки из маслостойкой резины *6*. К днищу приварены стальные балки *13*, на которых укреплены рымбол-

ты *12* для транспортировки конденсатора. Если цилиндрический корпус конденсатора изготовляется из гетинакса, то стальное кольцо для крепления крышки и днища при помощи винтов прикрепляют к наружной поверхности цилиндра.

Высота изоляционного корпуса выбирается в соответствии с размером по высоте выемной части конденсатора. Изоляционный корпус должен быть проверен на перекрытие при испытательном напряжении.

В конденсаторе ИМ-300-0,4 минимальное расстояние между болтами крышки и днища равно 785 *мм*.

Сухоразрядные напряжения по поверхности изоляторов при постоянном напряжении (так же, как и при переменном) близки к разрядным напряжениям воздушных промежутков игла — игла или игла — плоскость при тех же расстояниях. При расстоянии 50—30 *см* для системы игла (заземленная) — игла зависимость пробивного напряжения от расстояния определяется уравнением

$$U_{пр} = \sqrt{2}\ (5 \div 3{,}75\ h)\ кв\ макс,$$

где h — расстояние между электродами, *см*.

Для конденсатора ИМ-300-0,4

$$U_{пр} = \sqrt{2}(5 \div 3{,}75 \cdot 78{,}5) = 410\ кв.$$

Запас электрической прочности по испытательному напряжению

$$k_з = \frac{U_{пр}}{U_{исп}} = \frac{410}{360} = 1{,}14,$$

что является допустимым. Если острые края деталей крепления крышки и днища закрыть металлическими экранами, то запас по электрической прочности возрастет.

Вес конденсатора равен примерно 2000 *кг*, внешний объем 1850 $дм^3$, его удельная энергия на единицу веса составляет 8,1 *дж/кг* и на единицу объема 12 $дж/дм^3$.

Относительно низкие удельные характеристики определяются тем, что внутренний объем конденсатора только на 39% заполнен активными материалами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Багалей Ю. В., О разрушении диэлектрика бумажно-масляных конденсаторов для импульсных схем, «Электричество», 1955, № 3.

2. Варшавский Д. С., Расчет электрических характеристик многослойного диэлектрика из пропитанной конденсаторной бумаги, «Электричество», 1961, № 11.

3. Варшавский Д. С., Ланцев А. Г., Шофман О. С., Петрашкевич Н. П., Конденсаторы для повышения коэффициента мощности серий КВМ и КВС, «Вестник электропромышленности», 1962, № 5.

4. Грейсух М. А., Кучинский Г. С., Каплан Д. А., Мессерман Г. Т., Бумажно-масляная изоляция в высоковольтных конструкциях, Госэнергоиздат, 1963.

5. Карпов Н. И., Тиханова О. В., Высоковольтные конденсаторы, «Труды ЛПИ им. Калинина», 1948, № 3.

6. Карпов Н. И., Кучинский Г. С., Тиханова О. В., Высоковольтные конденсаторы в изолирующих кожухах, «Труды ЛПИ им. Калинина», 1954, № 1.

7. Карпов Н. И., Кучинский Г. С., Тиханова О. В., Новые конструкции высоковольтных конденсаторов, «Вестник электропромышленности», 1956, № 10.

8. Кучинский Г. С., Литвинова Е. Л., Электрические характеристики бумажно-масляной изоляции при избыточном давлении масла, «Электричество», 1958, № 1.

9. Кучинский Г. С., Малоиндуктивные импульсные конденсаторы с малыми потерями в разрядном режиме, «Электричество», 1964, № 7.

10. Медведев С. К., Характеристики конденсаторов для повышения коэффициента мощности при частоте 50 *гц*, «Вестник электропромышленности», 1948, № 8.

11. Медведев С. К., Конденсаторы повышенной частоты с диэлектриком из пропитанной бумаги, «Вестник электропромышленности», 1958, № 4.

12. Медведев С. К., Бумажно-масляные конденсаторы, «Вестник электропромышленности», 1950, № 11.

13. Медведев С. К., Перегрузочные характеристики силовых бумажных конденсаторов, «Вестник электропромышленности», 1961, № 11.

14. Медведев С. К., Диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь бумажного диэлектрика, «Электричество», 1961, № 8.

15. Морозов М. М., Советское конденсаторостроение и его ближайшие задачи, «Электричество», 1949, № 11.

16. Морозов М. М., Медведев С. К., Конденсаторы для силовых установок, «Электричество», 1955, № 7.

17. Назаров Н. И., Работа бумажно-масляных конденсаторов при несинусоидальном напряжении, «Изв. вузов СССР — Энергетика», 1960, № 1.

18. Назаров Н. И., Переселенцев И. Ф., Влияние коэффициента запрессовки на электрические характеристики бумажно-масляного конденсатора, «Вестник электропромышленности», 1960, № 6.

19. Поляков Б. А., Конденсаторные установки для повышения коэффициента мощности, Госэнергоиздат, 1962.

20. Развитие силового конденсаторостроения, Сб. работ ЦИНТИЭП, 1962.

21. Ренне В. Т., Расчет бумажного парафинированного конденсатора, «Вестник электропромышленности», 1931, № 11 и 12.

22. Ренне В. Т., Кучинский Г. С., Файницкий В. М., Выбор толщины диэлектрика для бумажных силовых конденсаторов, «Электричество», 1954, № 6.

23. Ренне В. Т., Морозова М. Н., Карпова К. И., Конденсаторная бумага с малыми диэлектрическими потерями, «Электричество», 1960, № 7.

24. Ренне В. Т., Морозова М. Н., Влияние плотности конденсаторной бумаги на ее свойства в пропитанном состоянии, «Изв. вузов СССР — Энергетика», 1961, № 9.

25. Ренне В. Т. и др., Оксидная бумага — новый вид конденсаторной бумаги, «Бумажиая промышлеиность», 1964, № 1.

26. Торощин П. А., Металлические кондеисаторы «Эиергия», 1965.

27. Фертик С. М., Геометрия высоковольтного конденсатора, Сб. научно-технических статей Харьковского электротехнического института, 1941, вып. 6.

28. Bercu A., Seria unitara de condensatoara de forta de joase si medie tensiune, «Electrotechnica», 1962, 10, №, 12.

29. Bibliography on power capacitors, «Power Apparatus and Systems», 1961, № 53.

30. Church H. F., Factors affecting the life of impregnated paper capacitors, «Proceed. IEE», 1951 p. III, № 52.

31. Crasucki Z., Church И. F., Garton C. G., Factors controlling the life of power capacitors, CIGRE, 1962, Session 16—26 May, Paper 138.

32. Gaussens P., Bouvier I., Dutournier G., Fournie H., Zanobetti D., The behaviour of capacitors under thermal stresser, CIGRE, 1962, Session 16—26 May, Paper 160.

33. Girling D. S., Direct voltage instantaneous breakdown of oil impregnated paper capacitors as function of area, «El. Communications», 1958, № 2.

34. Hansson B., The design of capacitors units for series connection, «Trans. AIEE», 1951, v. 70, p. II.

35. Held W., Kunze R., Glimmentladungen im Kondensatordielectrikum, «VDE — Fachberichten», 1958, B. 20.

36. Held W., Fortschritte beim Bau von Leitungs Kondensatoren, «ETZ», 1962, A 83, № 9.

37. Mayeur I. P., Etude de la longévité probable des condensateurs au papier, «Schweiz. Techn. Zeitschr.», 1960, Bd 57, № 20.

38. Neumann H., Smolka I., Gesichtspunkte für die Konstruction und die Herstellung von Blindleistung Kondensatoren, «Elektric», 1961, № 12.

39. Nordell R., Högfeldt L., Linderholm S., La rigidite electrique de condensateurs series, CIGRE, Session 1954, 12—22 May, Paper 419.

40. Peterson R., Life failure statisics of short rated oil paper capacitors elements, «The J. Brit. IRE», 1958, v. 18, № 3.

41. Pitts J. P., The reliability and life of oil impregnated paper capacitors, «Proceed. IEE», part A, 1959, v. 106», № 29.

ГЛАВА 4

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ С ПЛЕНОЧНЫМ ОРГАНИЧЕСКИМ СИНТЕТИЧЕСКИМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

§ 19. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЛЕНОЧНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Тонкие пленки из органических синтетических высокомолекулярных веществ с большой механической и электрической прочностью пригодны для изготовления намотанных конденсаторов, подобных бумажным по технологии и конструкции, но отличающихся улучшенными свойствами.

В настоящее время в конденсаторостроении применяются два основных типа синтетических пленок:

а) неполярные — полистирол, полиэтилен, политетрафторэтилен, полипропилен. Конденсаторы из этих пленок обычно имеют увеличенный удельный объем в сравнении с бумажными и резко улучшенные электрические свойства. По величине угла потерь и стабильности емкости они приближаются к слюдяным и высокочастотным керамическим конденсаторам. Характерная их особенность — возможность получения очень высокой постоянной времени и очень малого коэффициента абсорбции;

б) полярные — ацетат целлюлозы, полиэтилентерефталат, поликарбонат. Конденсаторы из этих пленок обычно имеют меньший удельный объем по сравнению с бумажными и отличаются повышенными постоянной времени и верхним пределом рабочей температуры.

Синтетические пленки не столько заменяют бумагу в конденсаторном производстве, сколько дополняют ее в тех случаях, когда к намотанному конденсатору предъявляются такие требования в отношении электрических свойств

и диапазона рабочих температур, которые нельзя выполнить, используя бумагу. В некоторых случаях удачные результаты можно также получить, комбинируя в диэлектрике конденсатора пленку и бумагу.

§ 20. ПЛЕНОЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ ИЗ НЕПОЛЯРНЫХ СИНТЕТИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

Основным отличием неполярных пленок от конденсаторной бумаги является пониженный угол потерь, дающий возможность использовать их не только при постоянном токе и низких частотах, но и при высокой частоте, а также высокое удельное сопротивление. Величина температурного коэффициента емкости зависит от типа пленки, но она обычно ниже, чем для бумажных конденсаторов, причем имеет отрицательное значение. Верхний предел рабочей температуры может быть и ниже, чем для бумаги (полистирол) и выше (политетрафторэтилен).

Пленочные конденсаторы изготовляются намоткой из лент пленки и металлической фольги. Некоторые типы пленок (например, полистирол) допускают металлизацию, так же как и конденсаторная бумага.

При низком напряжении пленочные конденсаторы применяются в непропитанном виде. В этом случае обычно намотанные секции подвергаются запеканию при повышенной температуре. В процессе запекания происходит усадка пленки и витки секции стягиваются, выжимая из зазора между слоями пленки и фольги значительную часть воздуха. При этом емкость немного увеличивается (на несколько процентов) и повышается стабильность емкости во времени и при колебаниях температуры. Вследствие высокой влагостойкости неполярных пленок, намотанные секции при умеренной влажности могут применяться без дополнительной влагозащиты. При высокой влажности обычно необходима герметизация. При этом следует применять не стеклянные, а керамические выводные изоляторы, так как утечка по стеклу в условиях влажности может заметно снизить высокую постоянную времени конденсаторов.

При высоком напряжении наличие остаточного воздуха между слоями пленки и между пленкой и фольгой недопустимо, так как способствует развитию ионизационных процессов, быстро разрушающих пленки, особенно политетрафторэтиленовую. Поэтому следует секции высоковольтных

пленочных конденсаторов пропитывать жидким диэлектриком или заполнять сжатым газом. Операция запекания при этом не производится, так как слипание пленки на торцах запеченных секций будет препятствовать проникновению пропиточной массы или сжатого газа в зазоры между пленкой и фольгой и между слоями пленки.

Если можно допустить увеличение угла потерь, то применяют комбинированный диэлектрик пленка — бумага: секции наматывают из пленки, конденсаторной бумаги и фольги с таким расчетом, чтобы бумага приходилась между слоями пленки (рис. 133). В данном случае бумага является фитилем, облегчающим проникновение пропиточной жидкости в зазоры между слоями пленки. В зазор между пленкой и фольгой жидкость проникает хорошо за счет смачиваемости поверхности фольги. Толщину бумаги, чтобы не увеличивать чрезмерно потери, надо брать меньше толщины пленки. Электрическая прочность комбинированного конденсатора выше, чем у чисто пленочного.

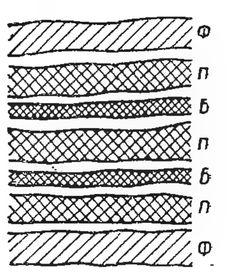


Рис. 133. Схема конструкции диэлектрика в комбинированном пленочно-бумажном конденсаторе.

Некоторые характеристики неполярных синтетических пленок, применяемых в конденсаторостроении, приведены в табл. 35. Полипропилен, не указанный в таблице, близок

Таблица 35

Свойства неполярных синтетических пленок

Характеристика	Полистирол (стирофлекс)	Полиэтилен	Политетрафторэтилен (фторопласт-4)
Диэлектрическая проницаемость при 20° С	2,5	2,2	2,0
Тангенс угла потерь, 20° С	$(2 \div 3) \cdot 10^{-4}$	$(3 \div 5) \cdot 10^{-4}$	$(1 \div 2) \cdot 10^{-4}$
Удельное объемное сопротивление, *ом·см*, 20° С . . .	10^{19}—10^{20}	10^{18}—10^{19}	10^{19}—10^{20}
Температурный коэффициент емкости (в конденсаторе) $\times 10^6$, *град*$^{-1}$	$-75 \div -150$	$-550 \div -700$	$-50 \div -150$
Пределы рабочей температуры, °С	От —60 до +60	От —60 до +90	От —60 до +200
Удельный вес, *г/см*^{3} . . .	1,05—1,07	0,92—0,95	2,2—2,3

к полиэтилену, но имеет выше нагревостойкость (100 ÷ ÷ 125%). Величины ε и $\operatorname{tg}\delta$ неполярных пленок практически не изменяются с частотой, а поэтому при расчете независимо от частоты можно ориентироваться на значения табл. 35 с учетом следующих дополнительных соображений.

1. Величина ε в диэлектрике конденсатора будет ниже, чем значения, указанные для пленок в табл. 35, за счет влияния зазоров между слоями. Для предварительных расчетов можно применять данные таблицы, умножив их на коэффициент запрессовки 0,9, т. е., снизив на 10%. На практике ε уточняется намоткой опытных секций и проверкой их емкости.

2. Величина $\operatorname{tg}\delta$, указанная в табл. 35, соответствует только потерям в пленке, т. е. потерям в диэлектрике конденсатора. Для определения $\operatorname{tg}\delta$ конденсатора в целом надо учесть потери в его металлических частях, руководствуясь параграфом 5. В конденсаторах рассматриваемого типа, особенно при высокой частоте, потери в металлических частях могут заметно превзойти потери в диэлектрике.

Рассмотрим конденсатор с комбинированным диэлектриком, состоящим из слоев неполярной пленки, имеющих общую толщину $d_п$ и электрические характеристики $\varepsilon_п$ и $\operatorname{tg}\delta_п$, и из слоев пропитанной бумаги суммарной толщиной $d_б$, с характеристиками $\varepsilon_б$ и $\operatorname{tg}\delta_б$. Для вычисления электрических параметров такого комбинированного диэлектрика можно воспользоваться формулами, основанными на рассмотрении простейшей последовательной схемы*:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_п \varepsilon_б (d_п + d_б)}{\varepsilon_п d_б + \varepsilon_б d_п} \tag{4-1}$$

и

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\operatorname{tg}\delta_п}{1 + \frac{\varepsilon_п}{\varepsilon_б} \cdot \frac{d_б}{d_п}} + \frac{\operatorname{tg}\delta_б}{1 + \frac{\varepsilon_б}{\varepsilon_п} \cdot \frac{d_п}{d_б}}. \tag{4-2}$$

В этих формулах значения $\varepsilon_п$ и $\operatorname{tg}\delta_п$ можно взять по табл. 35; значения $\varepsilon_б$ — по данным § 2; ориентировочные значения $\operatorname{tg}\delta_б$ при разных частотах для бумаги типа КОН-1, пропитанной неполярной массой, приведены на рис. 134. В формулах (4-1) и (4-2) не учитывается наличие зазоров между

* См. вывод формул (1-4) и (1-18).

слоями пленки и бумаги и потому при расчете получается лишь примерный порядок величин ε и $\operatorname{tg}\delta$.

Намотанные секции пленочных конденсаторов можно рассчитывать аналогично секциям бумажных конденсаторов после того как выбрана толщина диэлектрика. Обычно применяют цилиндрические секции, хотя при больших емкостях иногда используют и плоскопрессованные.

Выбор толщины диэлектрика, связанный с установлением допустимой напряженности поля, в данном случае усложняется тем, что конденсаторы с диэлектриком из неполярных пленок являются новым типом. Фактически из трех типов пленок, приведенных в табл. 35, в массовом производстве применяется только полистирол; фторопласт-4 используется только в условиях мелкосерийного производства, а полиэтилен практически лишь начинает опробоваться в конденсаторостроении.

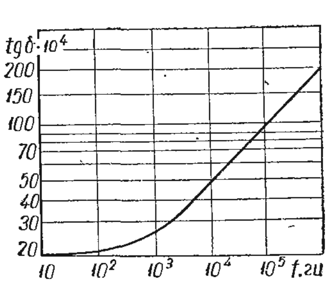


Рис. 134. Кривая зависимости потерь угла бумаги, пропитанной неполярной массой, от частоты.

Для полистирольных конденсаторов можно привести следующие ориентировочные данные, соответствующие работе при постоянном напряжении:

а) непропитанные запеченные секции с обкладками из фольги — диэлектрик 2×20 *мк* $E_р = (4 \div 6)$ *кв/мм* в зависимости от емкости (нижний предел при $C = (0{,}25 \div 1)$ *мкф* в одной секции), диэлектрик 3×20, 3×30 или 2×40 *мк* $E_р = (15 \div 20)$ *кв/мм* при небольших емкостях порядка 0,1 *мкф* и меньше;

б) непропитанные запеченные секции из металлизированной пленки — диэлектрик 1×20 и 1×30 *мк*, $E_р = 20$ *кв/мм* при небольших емкостях порядка 0,1 *мкф* и ниже. При $C = (0{,}25 \div 2)$ *мкф* $E_р = 12{,}5$ *кв/мм*.

При емкостях порядка 4—10 *мкф* (в собранном конденсаторе) для пленки 20 *мк* рабочее напряжение принимается 160 *в*, т. е. $E_р$ снижают до 8 *кв/мм*.

Испытательные значения напряженности поля для полистирольных конденсаторов с обкладками из фольги обычно принимают равным удвоенному рабочему значению. Это же соотношение можно сохранить и для металлизированных

полистирольных конденсаторов; пробивная напряженность для этих конденсаторов, при которой самовосстановление уже не происходит и конденсатор «закорачивается», составляет 75—150 *кв/мм*.

Металлизированные пленочные конденсаторы в отличие от однослойных металлобумажных имеют ограниченную способность к самовосстановлению.

При переменном напряжении частотой 50—5000 *гц* напряжение начала ионизации непропитанных полистирольных секций с диэлектриком 2×20 и 2×30 *мк* составляет 400—450 *в*, если определять его по перегибу кривой $\operatorname{tg}\delta = f(U)$ или по началу свечения у краев обкладок. Это соответствует напряженности поля порядка 7—11 *кв/мм*. Однако, учитывая, что слабая ионизация может начаться при несколько меньших напряжениях и что полистирол относительно быстро разрушается от воздействия ионизации, желательно брать напряженность поля ниже указанных значений.

Для надежности при переменном напряжении лучше не брать напряжение выше 250 *в* (эффективное значение) на одну непропитанную секцию; при толщине диэлектрика 4×20 *мк* получается напряженность 6,25 *кв/мм*, а при толщине 2×30 *мк* — 4,2 *кв/мм*. При увеличении числа слоев и толщины диэлектрика напряжение начала ионизации заметно не повышается, а поэтому при больших толщинах $E_р$ получается еще ниже указанных цифр. Пропитывая конденсатор жидким диэлектриком, можно заметно повысить напряжение начала ионизации и увеличить не менее чем в 2 раза напряженность поля, допуская 500 *в* на одну секцию.

Для пропитки полистирольных конденсаторов (собранных из незапеченных секций) следует применять высокоочищенное нефтяное масло, практически не содержащее ароматической фракции, которая может растворять полистирол. Для бумажно-полистирольных комбинированных конденсаторов известны попытки применения их при $E_р = 40 \div 50$ *кв/мм* при температуре до 85° С. При постоянном напряжении для такого комбинированного диэлектрика получено $E_{пр} = 290$ *кв/мм*.

Для непропитанных фторопластовых конденсаторов (фторопласт-4) в табл. 36 ориентировочно указаны значения допускаемых напряжений постоянного тока при разных толщинах диэлектрика.

Эти данные соответствуют емкостям до 0,25—0,5 *мкф* и рабочей температуре до 200° С. При напряжении переменного тока порядка 200—250 *в* такие конденсаторы могут применяться до частоты порядка нескольких сотен герц. При больших частотах надо учитывать нагрев конденсатора, обусловленный потерями в обкладках.

Для работы при высоких напряжениях разработаны фторопластовые конденсаторы, наполненные сжатым азотом при давлении 5—10 *атм*. Конденсаторы изготовляются с последовательным соединением секций, причем на одну секцию дают от 2 до 5 *кв* постоянного напряжения или 1 *кв* переменного. Напряженность поля при постоянном напряжении и 200° С составляет 40—45 *кв/мм*, при переменном напряжении 8,5 *кв/мм* (толщина диэлектрика в одной секции 4 ÷ 30 *мк*). Эти данные соответствуют емкостям до 0,05—0,1 *мкф*.

Таблица 36

Допускаемые напряжения постоянного тока при разных толщинах диэлектрика

Толщина диэлектрика, *мк*	Номинальное рабочее напряжение, *в*	Напряженность, *кв/мм*
3×5=15	200	13,3
3×10=30	600	20
4×10=40	1000	25

По американским данным полиэтиленовые пленки применяются толщиной 30—50 *мк* для рабочей температуры до 85—90° С. При нескольких слоях пленки и температуре 65° С указывается рабочая напряженность 40 *кв/мм* (постоянный ток). Эти данные, по-видимому, относятся к емкостям до 0,1 *мкф*. При переменном напряжении, как и для полистирола, необходимо выбирать рабочую напряженность ниже той, при которой может возникнуть ионизация. Для толщины 250 *мк* ионизирующая напряженность 4,8 *кв/мм*.

Для пропитки полиэтиленовых конденсаторов в США нефтяное масло не применяют, так как в нем полиэтилен набухает и частично растворяется; вместо него используют кремнийорганическую жидкость (жидкий полисилоксан).

При намотке некоторых типов пленочных конденсаторов цилиндрической формы последовательно соединяемые секции наматываются одна за другой на одну и ту же оправку, причем используются две ленты фольги, на которых в нужных местах делают обрывы. В этом случае ленты диэлектрика наматываются без обреза по окончании намотки каждой секции. Составляя схемы намотки таких конденсато-

ров, надо учитывать необходимость получения наименьшей индуктивности, как показано на рис. 135.

При расчете пленочных конденсаторов, предназначенных для работы на высокой частоте, необходимо уделять большое внимание снижению потерь в металле, и, в частности, применять намотку с выступающей фольгой.

Пример 1. Рассчитать полистирольный конденсатор открытого типа на рабочее напряжение 500 *в* постоянного тока емкостью 0,01 *мкф.*

Выбираем тип конденсатора с обкладками из фольги, двухслойный диэлектрик и, учитывая, что емкость конденсатора мала, принимаем повышенную напряженность поля — 8 *кв/мм.* Тогда толщина диэлектрика будет 500/8 = 62,5 *мк*. Берем два слоя пленки по 30 *мк* и получаем $E_p = 500/60 = 8{,}35$ *кв/мм,* что можно считать допустимым. Берем ширину пленки 30 *мм*; фольга — алюминиевая, толщиной 7 *мк* и шириной 30 *мм.*

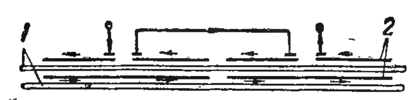


Рис. 135. Схема намотки четырехсекционного конденсатора с дополнительными выводами для уменьшения индуктивности:
1 — диэлектрик; 2 — обкладки.

Испытательное напряжение обычно берется двойным по сравнению с рабочим, т. е. 1000 *в.* При намотке с выступающей фольгой, согласно данным для бумажных конденсаторов, приведенным в табл. 22, принимаем закраину 3 *мм.* В этом случае края фольги выступают за торцы секции также на 3 *мм.* Активная ширина фольги составляет: $30 - 2 \times 3 = 24$ *мм* или 2,4 *см.* Принимаем диаметр намоточной оправки $D_o = 0{,}3$ *см.* Для определения наружного диаметра секции по формуле (1-55) вычисляем коэффициент

$$k_н = \frac{0{,}144\,(2 \cdot 30 + 7)\,2 \cdot 30}{2{,}2 \cdot 2{,}4} = 109{,}5,$$

тогда наружный диаметр намотанного конденсатора (секции)

$$D = \sqrt{D_o^2 + k_н C} = \sqrt{0{,}3^2 + 0{,}01 \cdot 109{,}5} = 1{,}1 \text{ см}.$$

С учетом влияния воздушных зазоров принято $\varepsilon = 2{,}2$. Длина конденсатора с учетом смятия фольги на торцах составляет примерно 32 *мм.* В начале и конце намотки конденсатора необходимо дать холостые витки. Полагаем по два холостых витка, что увеличит диаметр секции на $4{,}2 \cdot 30 = 240$ *мк,* или 0,24 *мм.* Такое увеличение диаметра несущественно. Число витков конденсатора можно подсчитать аналогично примеру 1 в § 12. Получаем $w = 30$.

Подсчитаем вес конденсатора, учитывая схему намотки (рис. 136). По формуле емкости намотанного конденсатора при $C = 10\,000$ *пф,* $\varepsilon = 2{,}2$ и толщине диэлектрика 60 *мк* или 0,006 *см* находим площадь обкладки, равную 155 *см*². При активной ширине обкладки 2,4 *см,* длина равна 63,5 *см.* Вес обкладок из алюминия ($\gamma = 2{,}7$ *г/см*³) составляет $2 \cdot 7 \cdot 10^{-4} \cdot 3 \cdot 63{,}5 \cdot 2{,}7 = 0{,}75$ *г.*

Длина лент пленки будет больше длины обкладки на длину холостых витков и составит 72,5 *см*. Тогда вес пленки $4{,}30 \cdot 10^{-4} \cdot 4{,}30 \times \times 10^{-4} \cdot 3 \cdot 72{,}5 \cdot 1{,}06 = 2{,}75$ *г*. Принимаем проволочные выводы, вес которых равен 0,85 *г*. Тогда вес конденсатора $0{,}75 + 2{,}75 + 0{,}85 = 4{,}35$ *г*.

С учетом того что выводы припаяны к торцам секций припоем, можно принять округленно вес конденсатора 4,5 *г*.

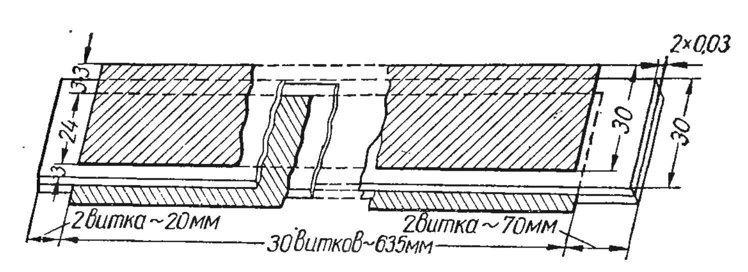


Рис. 136. Схема намотки полистирольного конденсатора.

Объем конденсатора $\frac{\pi}{4} \cdot 1{,}1^2 \cdot 3{,}2 = 3{,}04$ *см*³; удельная емкость $1000 : 3{,}04 = 3300$ *пф/см*³ и удельный вес $10\,000 : 4{,}35 = 2300$ *пф/г*. Внешний вид конденсатора показан на рис. 137.

Пример 2. Рассчитать конденсатор с диэлектриком из фторопласта-4 на рабочее напряжение постоянного тока 8 *кв* с номинальной емкостью 0,035 *мкф*; рабочая температура 200° С. Испытательное напряжение такого конденсатора равно 1,5 $U_р$, т. е. 12 *кв* постоянного тока. Принимаем рабочую напряженность поля $E_р = 40$ *кв/мм* согласно приведенным выше данным. Тогда толщина диэлектрика будет $8 : 40 = 0{,}2$ *мм*. Эта толщина относительно велика и не соответствует оптимальному значению, обеспечивающему наивысшую электрическую прочность. Выгоднее разбить конденсатор на две последовательно соединенные секции, при этом сократятся размеры закраин, а следовательно, уменьшится расход дорогостоящего диэлектрика.

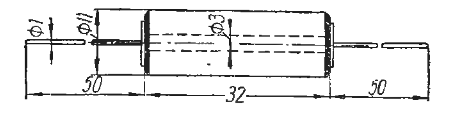


Рис. 137. Внешний вид полистирольного конденсатора (500 *в*, 0,01 *мкф*).

Емкость секции $0{,}035 \cdot 2 = 0{,}07$ *мкф*; толщина диэлектрика в секции $8 : 2 : 40 = 0{,}1$ *мм*, или 100 *мк*. Принимаем 4 слоя пленки по 25 *мк*. Ширину пленки берем 90 *мм*. Закраины надо рассчитать на половину испытательного напряжения, т. е. на $12 : 2 = 6$ *кв*. Полагая, что конденсатор будет заполнен сжатым газом (азот при давлении 5 *ата*), благодаря чему принята напряженность поля 40 *кв/мм*, можно допустить напряженность тангенциального поля на закраине 0,7—0,8 *кв/мм*, что дает закраину 7,5—9,5 *мм*. Принимаем размер закраины с запасом 10 *мм*. При намотке со скрытой фольгой это соответствует ширине

фольги 90 — 2 · 10 = 70 *мм*. Толщина фольги обычная, 7 *мк*, фольга алюминиевая. Полагаем, что секции будут наматываться одна на другую; диаметр намоточной оправки $D_o = 3$ *мм*. Коэффициент

$$k_н = \frac{0{,}144\,(4 \cdot 25 + 7)\,4 \cdot 25}{1{,}8 \cdot 7{,}0} = 122{,}5;$$

$\varepsilon = 0{,}9 \cdot 2 = 1{,}8$. Вычисляем диаметр первой секции

$$D_1 = \sqrt{0{,}3^2 + 122{,}5 \cdot 0{,}07} = 2{,}96.$$

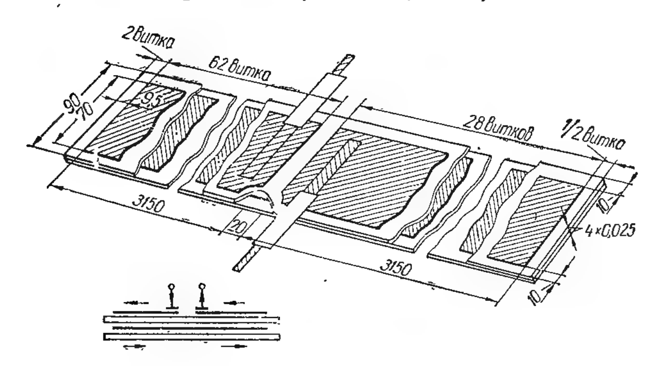


Рис. 138. Схема намотки фторопластового конденсатора.

Число витков первой секции

$$w_1 = \frac{2{,}96 - 0{,}3}{4\,(100 + 7) \cdot 10^{-4}} = 62.$$

Площадь обкладки в первой секции

$$S = \frac{7 \cdot 10^4 \cdot 100 \cdot 10^{-4}}{0{,}1768 \cdot 1{,}8} = 2200\ см^2.$$

Длина ленты фольги 2200 : 7 = 315 *см*. Диаметр второй секции

$$D_2 = \sqrt{8{,}66 + 8{,}6} = 4{,}15\ мм.$$

Число витков второй секции

$$w_2 = \frac{4{,}15 - 2{,}96}{4\,(100 + 7)\,10^4} = 28.$$

Длина ленты фольги, как и в первой секции, равна 315 *см*. Схема намотки фторопластового конденсатора показана на рис. 138. Холостые витки наматываются в начале и конце намотки, кроме того, выдерживается расстояние между разъединенными обкладками первой и второй секций. Между этими обкладками будет полное напряжение, а потому это расстояние берется в 2 раза больше закраины, т. е. 20 *мм*.

Длина первого холостого витка $\pi \cdot 3 = 9{,}5$ *мм*, длина последнего холостого витка $\pi \cdot 41{,}5 = 130$ *мм*. Если взять два холостых витка в начале и половину витка в конце намотки, то запас на перекрытие будет достаточно большим.

Длина лент $2 \cdot 315 + 2 \cdot 315 - 2{,}0 = 1262$ *см*. Вес фольги в конденсаторе $1262 \cdot 7 \cdot 7 \cdot 10^{-4} \cdot 2{,}7 = 16{,}6$ *г*. Длина лент пленки $2{,}315 + 2 + 2 \cdot 0{,}95 + 2 \cdot 130 = 894$ *см* (это для каждой ленты). Вес пленки в конденсаторе $2 \cdot 4 \cdot 25 \cdot 10^{-4} \cdot 894 \times 9 \cdot 2{,}25 = 362$ *г*.

Изготовляем конденсатор по типу ФГТ-И в керамическом корпусе с коваровой арматурой, припаянной к керамике с помощью переходного слоя стекла (рис. 139, *а*). Выводы конденсатора привариваются к диску, укрепленному сваркой на штифте, проходящем через стальную крышку и соединенном с полым выводным болтом, приваренным к крышке (рис. 139,*б*). Один из штифтов сделан с осевым отверстием, на его конец одевается резиновая трубочка, превращающая его в ниппель (рис. 139, *в*). Полый штифт используется для наполнения конденсатора газом после того, как обе крышки приварены к арматуре корпуса. После заполнения газом отверстие заваривается.

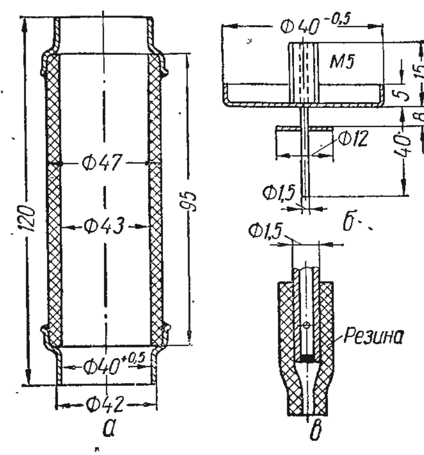


Рис. 139. Детали конструкции фторопластового конденсатора:

а — корпус из керамики с коваровыми кольцами на концах; *б* — крышка; *в* — ниппель.

Фторопластовый конденсатор в собранном виде показан на рис. 140.

Подсчитаем вес деталей конденсатора. Наружный диаметр керамического корпуса составляет 47 *мм*, внутренний — 43 *мм*, длина — 95 *мм*. Принимая удельный вес керамики 3,2 *г/см*³, получаем вес корпуса

$$\frac{\pi}{4}(4{,}7^2 - 4{,}3^2) \quad 9{,}5 \cdot 3{,}2 = 83{,}5 \text{ г}.$$

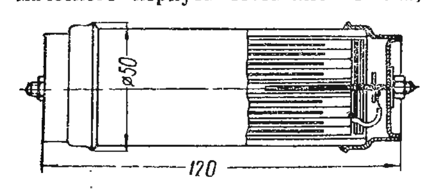


Рис. 140. Фторопластовый конденсатор (8 *кв*, 0,035 *мкф*).

Вес арматуры (с одной стороны) с крышкой и выводным болтом 15 *г*, т. е. 30 *г* с обоих концов конденсатора. Полный вес конденсатора $16{,}6 + 362 + 83{,}5 + 30 = 392{,}1 \approx 400$ *г*. Данный конденсатор рассчитан на рабочее напряжение 8 *кв* постоянного тока.

При переменном напряжении необходимо учитывать недопустимость ионизации в конденсаторе, так как фторопласт-4 обладает весьма

низкой короностойкостью. При наполнении азотом, напряжение переменного тока может составлять до 1 *кв* на секцию. В данном случае при двух секциях для конденсатора можно установить рабочее напряжение 2 *кв* (эффективное значение при частоте 50 *гц*). При высокой частоте допустимое напряжение определяется допустимым нагревом.

Боковая поверхность конденсатора, отводящая тепло, составляет примерно $\pi \cdot 4{,}7 \cdot 12 = 177$ *см*². Если допустить перегрев на поверхности 10° С и принять в первом приближении коэффициент теплоотдачи равным $1 \cdot 10^{-3}$ *вт/см*² · *град*, то активная мощность, которую может отвести данный конденсатор, составит $177 \cdot 10 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 1{,}77$ *вт*. Тангенс угла потерь политетрафторэтиленового конденсатора (фторопласт-4) при низкой частоте и температуре 200° С составляет $3 \cdot 10^{-4}$; эта величина характеризует потери в диэлектрике. При высоких частотах угол потерь должен увеличиться за счет потерь в фольге. Согласно данным гл. 1, принимая удельное сопротивление алюминия равным $3 \cdot 10^{-6}$ *ом · см*, находим эффективное сопротивление обкладок, соответствующее суммарной емкости конденсатора,

$$2 \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{315}{7 \cdot 7 \cdot 10^{-4}} \cdot 3 \cdot 10^{-6} = 0{,}086 \text{ ом}.$$

Учитывая наличие добавочных потерь в выводах и контактах, принимаем $r_a = 0{,}1$ *ом*.

Составляющая тангенса угла потерь, обусловленная потерями в металлических частях, может быть получена умножением r_a на емкость и угловую частоту.

Допустим, что надо вычислить $\operatorname{tg}\delta$ для частоты 10^5 *гц*:

$$0{,}1 \cdot 2\pi \cdot 10^5 \cdot 0{,}035 \cdot 10^{-6} = 22 \cdot 10^{-4}.$$

Эта величина значительно превышает цифру $3 \cdot 10^{-4}$, соответствующую диэлектрику конденсатора. В сумме получим $\operatorname{tg}\delta = 25 \cdot 10^{-4}$.

Допускаемое напряжение при частоте 10 *гц*, при котором перегрев будет не выше заданного (10° С), определится из выражения (1-121):

$$U = \sqrt{\frac{1{,}77}{2\pi \cdot 10^5 \cdot 0{,}035 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}0025}} = 180 \text{ в},$$

т. е. рабочее напряжение такого конденсатора при частоте 10^5 *гц* будет много ниже, чем при 50 *гц*. Если бы при расчете учитывалась работа конденсатора при частоте 10^5 *гц*, то следовало бы выполнить намотку с выступающей фольгой, что резко снизило бы потери в обкладках. При этом уже надо было бы изменить конструкцию секций: вместо двух намотанных одна на другую секций взять две секции, намотанные из пленки вдвое меньше ширины, и поставить их одна на другую коаксиально. Если бы конденсатор имел намотку с выступающей фольгой и ширина фольги составляла бы не 7, а 3,5 *см*, то, согласно данным § 1, эффективное сопротивление снизилось бы до значения

$$2 \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{3{,}5}{630{,}7 \cdot 10^{-3}} \cdot 3 \cdot 10^{-6} = 3{,}2 \cdot 10^{-4} \text{ ом}.$$

При частоте 10^5 *гц* это дает значение тангенса угла потерь $3{,}2 \times \times 10^{-4} \cdot 2\pi \cdot 10^5 \cdot 0{,}035 \cdot 10^{-6} = 7 \cdot 10^{-6}$, т. е. значительно меньше, чем для угла потерь диэлектрика.

Если принять для данного случая суммарный тангенс угла потерь с запасом ($\mathrm{tg}\delta \approx 4 \cdot 10^{-4}$), то допускаемое напряжение

$$U = \sqrt{\frac{3{,}2 \cdot 10^4 \cdot 25 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 10^{-4}}} = 450\ \text{в}.$$

Отсюда следует, что в этом случае существенное повышение рабочего напряжения может быть достигнуто только за счет форсированного охлаждения. Если бы заданная рабочая температура была не столь высока, (200° С), то повышение напряжения можно было достигнуть повышением допустимой температуры перегрева.

Пример 3. Рассчитать конденсатор с комбинированным бумажно-полистирольным диэлектриком на рабочее напряжение 4 *кв* постоянного тока емкостью 0,5 *мкф*.

Примем условно рабочую напряженность 50 *кв/мм*. Тогда толщина комбинированного диэлектрика будет $d = 4/50 = 0{,}08$ *мм*, или 80 *мк*. Составляем диэлектрик из трех слоев полистирольной пленки по 20 *мк* и двух слоев бумаги по 10 *мк*, располагая их так, как показано на рис. 133. По формуле (4-1) находим эффективную диэлектрическую проницаемость, полагая, что конденсатор пропитан неполярной жидкостью (маслом) и что взята бумага типа КОН-1,

$$\varepsilon = \frac{2{,}2 \cdot 3{,}5\,(60 + 20)}{2{,}2 \cdot 20 + 3{,}5 \cdot 60} = 2{,}4.$$

Принимаем ширину пленки и бумаги 125 *мм*. При испытательном напряжении $1{,}5 \cdot 4 = 6$ *кв* принимаем закраину 10 *мм* и намотку со скрытой фольгой. Тогда ширина фольги $125 - 2 \cdot 10 = 105$ *мм*, толщина фольги — 7 *мк* (алюминий). Выбираем диаметр оправки 30 *мм*.

Вычисляем по формуле (1-55) коэффициент

$$k_{\text{н}} = \frac{0{,}144\,(80 + 7)\,80}{2{,}4 \cdot 10{,}5} = 39{,}7.$$

В процессе намотки наружный диаметр секции

$$D = \sqrt{3^2 + 39{,}7 \cdot 0{,}5} = 5{,}4\ \text{см}.$$

Число витков секции

$$w = \frac{5 \cdot 4 - 3}{4\,(80 + 7)10^{-4}} = 69.$$

Подвергая секцию прессовке, получаем толщину секции

$$\Delta_{\text{с}} = 4 \cdot 69\,(80 + 7)\,10^{-4} = 2{,}4\ \text{см}.$$

Ширина секции при прессовке без ограничения

$$a = \frac{\pi \cdot 3}{2} + 1{,}2 \cdot 2{,}4 = 7{,}58\ \text{см}.$$

Секция получилась недостаточно удобной для изготовления из-за большой толщины, а потому удобнее разбить конденсатор на 2 параллельно соединяемые секции емкостью по 0,25 *мкф*. Сохраняя тот же диаметр оправки, получим $D = 4{,}35$ *см*, $w = 39$, $\Delta_c = 1{,}36$ *см* и $a = 6{,}53$ *см*.

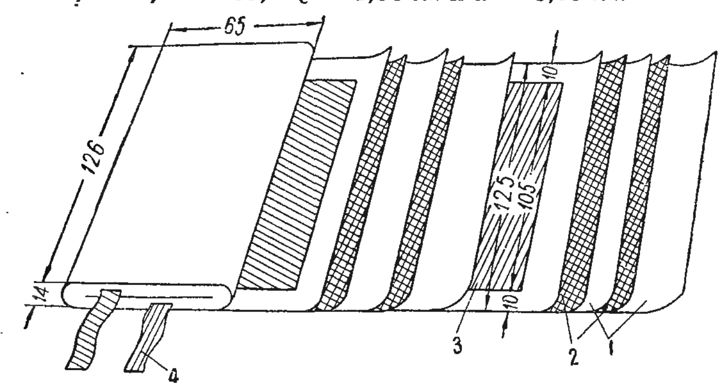


Рис. 141. Схема намотки секции конденсатора с комбинированным диэлектриком:

1 — пленка 20 *мк*; *2* — бумага 10 *мк*; *3* — фольга алюминиевая 7 *мк*; *4* — фольга медная луженая 25 *мк*.

Учитывая небольшие смещения при намотке, увеличивающие длину секции по сравнению с шириной лент диэлектрика, получаем габаритные размеры секции 126 × 65 × 14 *мм*. Схема намотки секции конденсатора показана на рис. 141, а размеры пакета из двух секций с изоляцией от корпуса — на рис. 142. Наружные размеры корпуса, в котором можно разместить этот пакет, составляют 135 × 70 × 35 *мм*. Объем корпуса составляет 330 *см*^{3}, удельный объем 330 : 0,5=660 *см*^{3}/*мкф*.

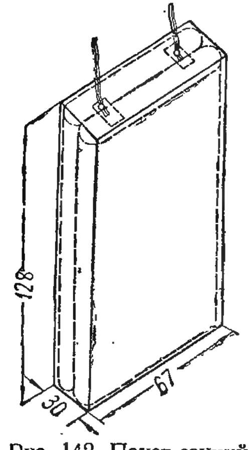


Рис. 142. Пакет секций комбинированного конденсатора.

Аналогичный конденсатор типа КБГ-П, бумажный, на 4 *кв* и 0,5 *мкф*, имеет размеры 78 × 58 × 135 *мм* и удельный объем 1220 *см*^{3}/*мкф*, т. е. в 1,83 раза больше, чем рассчитанный конденсатор с комбинированным диэлектриком. Надо, однако, иметь в виду, что для расчета принята напря-

женность поля 50 *кв/мм*, возможность использования которой при длительной работе требует еще экспериментальной проверки. Внешнее оформление конденсатора с комбинированным диэлектриком не отличается от оформления обычных бумажных конденсаторов. Вес конденсатора можно подсчитать аналогично бумажным.

Подсчитаем тангенс угла потерь диэлектрика в комбинированном варианте и сравним с данными для обычного бумажного конденсатора. Используя формулу (4-2) и приняв для полистирола $\operatorname{tg}\delta_п = 2{,}5 \cdot 10^{-4}$, а для бумаги при частоте 10^4 *гц* (по рис. 134) $\operatorname{tg}\delta_б = 50 \cdot 10^{-4}$, получаем

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{2{,}5 \cdot 10^{-4}}{1 + \frac{2{,}2 \cdot 20}{3{,}5 \cdot 60}} + \frac{50 \cdot 10^{-4}}{1 + \frac{3{,}5 \cdot 80}{2{,}2 \cdot 20}} = 2{,}06 \cdot 10^{-4} + 8{,}7 \cdot 10^{-4} + \\ + 8{,}7 \cdot 10^{-4} = 11 \cdot 10^{-4}.$$

Таким образом, угол потерь комбинированного конденсатора снижен в сравнении с бумажным примерно в 5 раз.

В этом расчете не учтены потери в обкладках, которые при частоте 10^4 *гц* могут быть уже достаточно заметны. Если надо полностью использовать преимущество комбинированного конденсатора в отношении снижения $\operatorname{tg}\delta$, то следует использовать намотку с выступающей фольгой, чтобы свести к минимуму потери в обкладках.

Максимальная рабочая температура для полистирола принимается равной 60—70° С. Для комбинированного диэлектрика ее можно повысить до 85° С, что является преимуществом такого диэлектрика перед обычным полистиролом.

§ 21. ПЛЕНОЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ С ДИЭЛЕКТРИКОМ ИЗ ПОЛЯРНЫХ СИНТЕТИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

Недостатком неполярных пленок является низкая диэлектрическая проницаемость (ниже 2,5), что увеличивает удельный объем конденсаторов. Поэтому для конденсаторостроения представляет интерес применение полярных пленок с более высокой ε. Обычно повышение ε у таких пленок связано с увеличением $\operatorname{tg}\delta$, а потому конденсаторы с диэлектриком из полярных пленок рассчитываются на использование при постоянном токе или в цепях тока низкой частоты.

В СССР полярные пленки еще не нашли себе широкого применения в конденсаторном производстве, а потому

в этом параграфе используются лишь некоторые зарубежные данные, недостаточно полные и нуждающиеся в проверке применительно к нашим условиям.

Некоторые характеристики полярных синтетических пленок, применяемых в современном конденсаторостроении, по данным США и ФРГ, приведены в табл. 37.

Таблица 37

Свойства полярных синтетических пленок

Материал пленки	γ, *г/см³*	$t_{макс}$, °C	ε	tg δ при 1000 *гц* и 20° C	ρ_v при 20° C, *ом·см*	$E_{пр}$, *кв·мм*	ТКЕ×$\times 10^6$, *град*$^{-1}$
Ацетат целлюлозы	1,24	125 (65)	3,7	0,015	$4\cdot10^{15}$	100—150	700
Полиэтилентерефталат	1,40	130	3,2	0,005	10^{18}	150—250	500
Поликарбонат	1,20	140	3,0	0,002	10^{17}	150—200	350
Полиуретан (слой лака на фольге)	1,30	100	3,9	0,007	10^{16}	200	450

По данным табл. 37 видно, что все полярные пленки, которые до сих пор известны в конденсаторном производстве, обладают относительно небольшой диэлектрической проницаемостью — от 3 до 4, т. е. всего лишь в 1,5—2 раза выше, чем у неполярных пленок и ниже, чем у пропитанной бумаги. Поэтому пленочные конденсаторы данного типа могут конкурировать с бумажными только в том случае, если пленка обеспечивает получение более высокой рабочей температуры или допускает применение более высокой напряженности поля, чем для пропитанной бумаги.

Ацетатная пленка применяется в США (пластикон А) и в ФРГ (триафоль). Точный состав ее неизвестен; возможно это триацетат целлюлозы, но может быть и более сложное соединение, например типа ацетобутирата целлюлозы.

Свободная пленка изготовляется с относительно большим нижним пределом толщины — не ниже 20 *мк**, поэтому применение ее для конденсаторов низкого напряжения невыгодно. Хотя в США конденсаторы из такой пленки изготовляются с номинальным напряжением от 600 *в*, но

* На подложке, в производстве лакопленочных конденсаторов, можно получать толщину триацетатной пленки порядка 2—3 *мк*.

наилучшие результаты в отношении удельного объема получаются при номинальных напряжениях от 2—3 *кв*.

Допускаемая напряженность постоянного поля составляет 60—65 *кв/мм*, что дает повышение удельного запаса энергии примерно в 2 раза по сравнению с обычными бумажными конденсаторами. Однако указанное значение $E_р$ соответствует температуре до 65° С. В рекламе указывается, что при пропитке маслом конденсаторы могут работать при температуре до 100° С, а при пропитке жидким полисилоксаном — до 125° С, однако при этом резко снижается номинальное напряжение, т. е. значение $E_р$. Так, при 85° С допускается 70% от номинального напряжения при 65° С, при 105° С — 55%, а при 125° С — 40%. Таким образом, при 125° С $E_р \approx 24 \div 26$ *кв/мм*. При этом особого выигрыша по сравнению с пропитанной бумагой уже не наблюдается.

При расчете ацетатных конденсаторов значение ε, взятое из табл. 37, для учета влияния зазоров между слоями пленки в конденсаторах надо снижать примерно на 10%.

Пленки из полиэтилентерефталата начали широко применяться за рубежом (майлар — в США, хостафан — в ФРГ, мелинекс — в Англии и т. д.). Преимуществом их является большая механическая прочность — можно получать толщины до 6 *мк* и даже до 3,5 *мк*. Пленки имеют высокое удельное сопротивление и высокую электрическую прочность. Учитывая малую толщину того же порядка, как у конденсаторной бумаги, эти пленки можно применять как в конденсаторах низкого, так и высокого напряжения. Их можно также металлизировать, а при высоком напряжении целесообразно использовать в комбинации с бумагой и применять пропитку маслом или полисилоксаном. В таком комбинированном диэлектрике бумага играет роль «фитиля», всасывающего пропиточную массу в зазоры между слоями пленки, так как сама пленка плохо смачивается пропиточными жидкостями.

Вопрос о максимальной температуре для конденсаторов из полиэтилентерефталатовой пленки еще не решен окончательно: разные фирмы указывают разные значения: от 125 до 150° С. По-видимому, без сильного снижения $E_р$ можно работать до температуры порядка 125° С. По американским данным для конденсаторов низкого напряжения, изготовляемых без пропитки, при 125 — 130° С допускается $E_р = 15 \div 30$ *кв/мм* (постоянного тока) в зависимости от

толщины пленки и числа слоев. При толщинах порядка 15—20 *мк* можно изготовлять однослойные конденсаторы с обкладками из фольги, так как пленка имеет сильно сниженное число токопроводящих включений по сравнению с бумагой. Пленку толщиной 6 *мк* применять в один слой можно только при использовании металлизации. Для конденсаторов с комбинированным диэлектриком при высоком

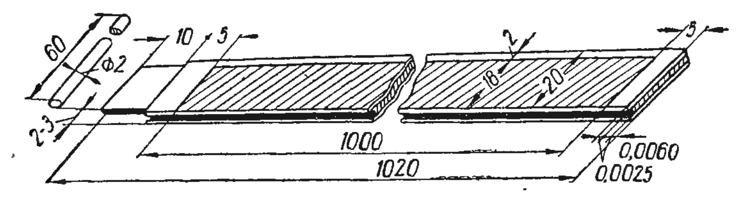


Рис. 143. Развернутая секция лакофольгового конденсатора.

напряжении и наличии пропитки можно применять значения $E_р$ более высокие, чем для бумажных конденсаторов, вероятно, не меньше 60—65 *кв/мм*. Эти данные требуют уточнения. В СССР полиэтилентерефталатовая пленка разработана под названием лавсан.

Поликарбонатовая пленка выпускается в ФРГ под названием макрофоль. Вопрос о применении ее для конденсаторов — еще в начальной стадии. Преимуществом ее перед пленкой из полиэтилентерефталата является несколько повышенная рабочая температура (до 140° С) и заметно сниженный tgδ и малый ТКЕ, меньше, чем у полистирольных конденсаторов. По удельному сопротивлению она не уступает полиэтилентерефталатовой пленке, но имеет бóльшую толщину (минимум 10 *мк*), хотя с применением подложки можно получать пленки толщиной до 2 *мк*.

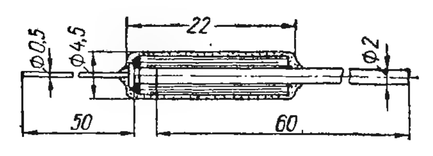


Рис. 144. Лакофольговый (металлолаковый) конденсатор (75 *в*, 0,5 *мкф*).

Пленка из полиуретана применяется не в свободном виде, а в виде тонкой пленки (2—3 *мк*), нанесенной на алюминиевую фольгу. В ФРГ она известна под названием десмофен. Из лакированной (т. е. покрытой этой пленкой) фольги изготовляют малогабаритные конденсаторы на

напряжение до 100 *в*, используя в качестве второй обкладки тонкий слой металла, нанесенный на пленку испарением в вакууме — лакофольговые или металлолаковые конденсаторы.

Развертка секции такого конденсатора показана на рис. 143, а разрез конденсатора — на рис. 144.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кучинский Г. О., Малоиндуктивный конденсатор с малыми потерями, «Электричество», 1964, № 7.
2. Ренне В. Т., Бутра А. П., Поведение полистирольных конденсаторов при воздействии переменного напряжения, ЖТФ, 1954, № 11.
3. Ренне В. Т., Морозов М. М., Итальянское конденсаторостроение, «Изв. вузов СССР — Электромеханика», 1960, № 9.
4. Ренне В. Т., Новый тип малогабаритного конденсатора — металлолаковый, «Электричество», 1960, № 4.
5. Ренне В. Т., Пленочные конденсаторы с органическим синтетическим диэлектриком, Госэнергоиздат, 1963.
6. Charlton C. B., Shen T. E., Plastic film dielectric capacitors, «Proceed», IEE, 1962, v. 109, № 22.
7. Cozens J. H., Developments of plastic dielectric capacitors «IRE Trans. on Comp. Parts», 1959, v. 6, № 2.
8. Girling D. S., The coated — foil capacitor «Proceed. IEE», 1962, v. 109, № 22.
9. Lamphier W. C., Plastic film capacitors, «Electronic World», 1965, 74, № 1.
10. New metallized polycarbonate capacitors, «Bell Laboratory Record», 1963, 41, № 9.

ГЛАВА 5

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ

§ 22. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ

В электролитических конденсаторах диэлектриком служит тонкий слой оксида вентильного металла, который создается на поверхности этого металла электролитическим путем. Толщина этого слоя зависит от напряжения формовки и при малых напряжениях может быть получена менее 0,1 *мк*. В связи с этим при небольших рабочих напряжениях для электролитических конденсаторов можно получать высокие значения $c_{уд}$. В качестве вентильных металлов при изготовлении конденсаторов ранее применялись лишь алюминий и тантал, но в последнее время удачные результаты получаются с применением ниобия и титана.

Если нижний предел $U_р$ у электролитических конденсаторов снижен в сравнении с обычным, то верхний также снижен и обычно не превышает 450—550 *в* для алюминиевых конденсаторов и 100—150 *в* для танталовых.

В обычных конструкциях электролитических конденсаторов второй обкладкой является электролит в жидком или пастообразном виде. Резко увеличенное сопротивление этой обкладки вызывает увеличение $\operatorname{tg}\delta$ конденсатора до величины порядка 0,1—0,2 и ухудшает температурно-частотную зависимость емкости. Поэтому обычные алюминиевые электролитические конденсаторы применялись только в цепях постоянного или выпрямленного тока и для неответственных целей.

В настоящее время созданы новые конструкции электролитических конденсаторов, в которых рабочий электролит

заменен твердым полупроводником MnO_2, а при небольших емкостях — тонким металлическим слоем, наносимым на поверхность оксида испарением в вакууме. В этих конденсаторах $\operatorname{tg}\delta$ снижен, а температурно-частотная зависимость емкости улучшена, в результате чего можно расширить применение этих конденсаторов, особенно в аппаратуре с полупроводниковыми приборами, где требуются небольшие рабочие напряжения.

§ 23. ПОЛЯРНЫЕ СУХИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Полярные сухие конденсаторы являются основным типом электролитических конденсаторов, применяемых в современной технике. Термин «полярный» применительно к электролитическому конденсатору обозначает, что конденсаторы рассчитаны на постоянное напряжение и требуют соблюдения определенной полярности при включении в цепь. Один определенный вывод конденсатора должен приключаться к зажиму плюс (обычно это изолированный вывод), а второй вывод — к зажиму минус (обычно это вывод от корпуса конденсатора, если последний металлический). Если конденсатор имеет два изолированных вывода, то около них должна быть сделана маркировка «+» и «—».

Основное количество выпускаемых сухих конденсаторов изготовляется из алюминия, но выпускаются также и сухие танталовые. Они обладают уменьшенным удельным объемом вследствие увеличенной ε слоя Ta_2O_5 и возможности применения более тонкой танталовой фольги. Электрические характеристики танталовых конденсаторов заметно улучшены в сравнении с алюминиевыми, в частности, повышена постоянная времени и ослаблена зависимость емкости и угла потерь от температуры и частоты, однако резко увеличенная цена и дефицитность тантала ограничивают их применение.

Обычно при расчете конденсатора исходят из выбора толщины диэлектрика и определенного значения ε. Для электролитических конденсаторов точное определение толщины диэлектрика затруднено, а в отношении величины ε наиболее правдоподобными значениями можно считать: для оксида алюминия 10 и для оксида тантала 25.

Практически для расчета электролитических конденсаторов пользуются не величиной ε, а значениями удельной емкости $c_{уд}$, рассчитанной на единицу площади анодной

фольги с учетом зависимости этой величины от напряжения формовки, а также с учетом увеличения удельной поверхности анода травлением анодной фольги, если таковое предусмотрено при изготовлении рассчитываемого типа конденсатора,

$$c_{уд} = \frac{k_ф k_{тр}}{U_ф}, \qquad (5\text{-}1)$$

где $c_{уд}$ — в *мкф/см²*;

$k_ф$ — коэффициент формовки, *мкф · в/см²*;

$k_{тр}$ — коэффициент травления. Для гладкого алюминиевого анода $k_{тр} = 1$ и $k_ф = (10 \div 12)$ *мкф·в/см²*;

$U_ф$ — напряжение формовки, *в*.

Здесь удельная емкость рассчитана на площадь анода, т. е. на его поверхность с одной стороны:

$$c_{уд} = \frac{C_н}{bl}, \qquad (5\text{-}2)$$

где $C_н$ — заданная (номинальная) емкость конденсатора, *мкф*;

b — ширина анода, *см*;

l — его длина, *см*.

Верхний предел указанных значений $k_ф$ соответствует более высоким значениям формовочного напряжения, порядка сотен вольт. Для гладкого танталового анода, в соответствии с увеличенной ε оксида тантала, можно принять значения $k_ф = 25 \div 30$.

Коэффициент травления выбирается в соответствии с условиями применения конденсатора. Для конденсаторов, работающих при нижнем пределе температур до —60° С, травление вообще не производят, т. е. $k_{тр} = 1$. При нижнем пределе рабочей температуры до —40° С для алюминиевых анодов обычно применяют $k_{тр} = 3 \div 5$ (при низком напряжении выше, чем при высоком). Если конденсатор не рассчитывается на работу при низких температурах, то можно брать $k_{тр} \approx 6 \div 10$. Травление танталовой фольги сопряжено с трудностями и для анодов из такой фольги можно принимать $k_{тр} = 1{,}5 \div 2{,}5$.

Формовочное напряжение, входящее в формулу (5-1), выбирается с некоторым запасом по отношению к заданному при расчете номинальному рабочему напряжению $U_р$. При рабочем напряжении ниже 50 *в* обычно $U_ф = (1{,}25 \div 1{,}50)\,U_р$, а при рабочем напряжении выше 50 *в* $U_ф = (1{,}17 \div 1{,}23)U_р$.

Следует иметь в виду, что в производстве сухих электролитических конденсаторов иногда применяется подформовка анодной фольги в растворе серной кислоты перед ее формовкой в растворе борной кислоты, создающей активный оксидный слой. При этом улучшаются характеристики конденсатора и его надежность в работе, но величина $c_{уд}$, полученная по формуле (5-1), снижается на 10—20%.

Значения $c_{уд}$, а соответственно и значения площади анода, которые можно найти по формуле (5-2), подлежат уточнению путем изготовления опытных конденсаторов, полученных на основе предварительного расчета. Вычислив $c_{уд}$ и задавшись шириной анодной фольги, по формуле (5-2) можно найти длину анодной фольги

$$l = \frac{C_{н}}{c_{уд} b}. \quad (5\text{-}3)$$

Анодная алюминиевая фольга может иметь толщину 0,05; 0,08; 0,10; 0,12 и 0,15 *мм*, танталовая — до 0,01 — 0,015 *мм*. Увеличенные значения толщины фольги выбираются при повышенных значениях рабочего напряжения и коэффициента травления. Алюминиевая фольга изготовляется шириной от 10 до 85 *мм*. Ширина танталовой фольги обычно берется небольшой, так как номинальная емкость у танталовых конденсаторов обычно меньше, чем у алюминиевых. При расчете расхода фольги для алюминия можно принять удельный вес 2,7 *г/см*^{3}, а для тантала 16,6 *г/см*^{3}. Волокнистым материалом, несущим рабочий электролит, в сухих конденсаторах является бумага толщиной 25—30, 50—60 и 80—100 *мк* с объемным весом соответственно 0,7; 0,6; 0,55 *г/см*^{3}; реже применяется ткань (перкаль, батист или вольта) с минимальной толщиной 110—120 *мк*. При малых напряжениях применяют также обычную конденсаторную бумагу КОН-1 толщиной 10—12 *мк*.

Ширину катодной фольги обычно принимают на 2—3 *мм* больше ширины анодной, ширина волокнистой прокладки берется на 6—8 *мм* больше ширины анода. Число слоев бумаги в волокнистой прокладке и ее общая толщина зависят от рабочего напряжения (табл. 38).

При использовании ткани прокладка применяется в один слой для напряжений до 300 *в* (включительно) и в два слоя при более высоких напряжениях.

При намотке секций электролитических сухих конденсаторов сначала дается 2 холостых витка (без анодной

и катодной фольги). Заканчивается намотка 1—2 витками катодной фольги, затрудняющей проникновение внутрь секций ионов загрязнений из заливочной массы.

После пропитки рабочим электролитом секцию обертывают конденсаторной или кабельной бумагой и вставляют в алюминиевый цилиндрический корпус. В корпусе секцию иногда заливают защитной заливочной массой, обычно сплавом битума с нефтяным маслом, имеющим температуру размягчения порядка 80—85° С. Торец секции должен быть покрыт слоем массы толщиной несколько миллиметров; между поверхностью массы и изоляционной крышкой должен быть оставлен буферный воздушный слой толщиной 5—8 *мм*. Анодный вывод секции приклепывается к алюминиевому пистону, запрессованному в изоляционную крышку; одновременно закрепляется и внешний контактный лепесток. Катодный вывод прижимается крышкой и резиновой шайбой к корпусу при закатке, закрепляющей крышку.

Таблица 38

Толщина бумажных прокладок в сухих конденсаторах

Рабочее напряжение, *в*	Общая толщина прокладки, *мк*	Число слоев бумаги в прокладке
До 150	60	1 или 2
300	90—100	1 или 2
400	120	2
450	200	2
500	220—250	3

Электролитические конденсаторы рассматриваемого типа применяются преимущественно как фильтровые конденсаторы в выпрямительной части радиоаппаратуры с питанием от сети переменного тока, а потому, кроме воздействия постоянной составляющей напряжения, подвергаются также воздействию переменной составляющей, которая может вызвать заметный нагрев конденсатора вследствие большого значения угла потерь.

В связи с этим полезно определить температуру, возникающую внутри конденсатора в заданных условиях его работы. По данным Л. Н. Закгейма для определения температуры на оси секции, т. е. максимальной температуры внутри конденсатора, можно воспользоваться формулой

$$t_{\text{макс}} = t_0 + \Delta t + \frac{P_{\text{а}}}{2\pi\Delta_{\text{c}}}\left(\frac{\ln r_2}{\lambda_2} + \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1\lambda_2}\ln r_1 + \frac{1}{2\lambda} - \frac{\ln r_0}{\lambda_1}\right)^*, \quad (5\text{-}4)$$

* Вывод формул (5-4) и (5-6) приведен в книге Л. Н. Закгейма [1], а потому здесь не излагается.

где Δ_c — высота секции, *см*;
r_0 — наружный радиус секции, *см*;
r_1 — внутренний радиус корпуса, *см*;
r_2 — наружный радиус корпуса, *см*;
λ — коэффициент теплопроводности материала секции;
λ_1 — коэффициент теплопроводности в слое от r_0 до r_1;
λ_2 — коэффициент теплопроводности материала корпуса (значения λ, λ_1 и λ_2 в *вт/см град*);
P_a — потери в конденсаторе, *вт*;
Δt — перепад температуры на наружной поверхности корпуса, *град*.

Величину P_a можно найти как сумму потерь, вызываемых постоянной и переменной составляющими напряжения, приложенного к конденсатору,

$$P_a = IU_{-} + \omega C U_{\sim}^2 \operatorname{tg}\delta, \tag{5-5}$$

где I — ток утечки; *а*;
U_{-} — постоянное напряжение, *в*;
$U_{\sim}$ — действующее значение составляющей переменного напряжения, *в*;
C — емкость конденсатора, *ф*;
$\omega = 2\pi f$, f — частота, *гц*;
$\operatorname{tg}\delta$ — тангенс угла потерь конденсатора.

Перепад температуры можно найти по формуле

$$\Delta t = \left[\frac{P_a}{\pi\beta\gamma\,(d)^{0,75}\Delta_c}\right]^{0,8}, \tag{5-6}$$

где d — диаметр корпуса конденсатора (удвоенное значение r_2), *см*;
β и γ — постоянные коэффициенты в формуле для вычисления коэффициента теплоотдачи цилиндрических тел

$$\alpha = \beta\gamma\left(\frac{\Delta t}{d}\right)^{0,25}. \tag{5-7}$$

При горизонтальном расположении цилиндра $\beta = 1$, $\gamma = 3{,}46^{-4}$, а при вертикальном расположении β находится по кривой на рис. 145 в зависимости от высоты цилиндра h, $\gamma = 3{,}31 \cdot 10^{-4}$. Указанные значения β и γ соответствуют значениям α, выраженным в *вт/см²·град*.

При расчете алюминиевых сухих конденсаторов можно использовать следующие значения коэффициентов теплопроводности в формуле (5-4): для материала секции конденсатора $\lambda = 3 \cdot 10^{-3}$ *вт/см·град*; для материала корпуса (алюминий) $\lambda_2 = 2{,}03$ *вт/см·град*; при зазоре между секцией и корпусом с заливкой (битум) $\lambda_1 = 1{,}4 \cdot 10^{-3}$ *вт/см·град* (при отсутствии заливки для тонкого слоя воздуха $\lambda = 0{,}22 \cdot 10^{-3}$ *вт/см·град*).

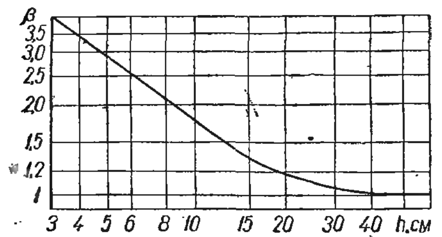


Рис. 145. График к тепловому расчету электролитического конденсатора.

При вычислении P_a по формуле (5-5) рекомендуется принимать значения тока утечки и $\operatorname{tg}\delta$, максимально допускаемые действующими нормами.

Пример. Рассчитать сухой алюминиевый полярный конденсатор на рабочее напряжение 450 *в*, емкостью 20 *мкф* группы М (нижний предел температуры — 40° С) при максимальном значении переменной составляющей напряжения, равной 10% от номинального напряжения постоянного тока.

Принимаем формовочное напряжение 550 *в* (на 22% выше номинального рабочего). Поскольку нижний предел температуры равен —40° С, можно использовать травление фольги; принимаем $k_{тр} = 4$. Коэффициент формовки берем на верхнем пределе $k_ф = 12$ *мкф · в/см²*, но, учитывая применение подформовки для повышения качества конденсаторов, снижаем это значение на 20%, получая $k_ф = 10$ *мкф · в/см²*. По формуле (5-1) находим удельную емкость анода

$$c_{уд} = \frac{10 \cdot 4}{550} = 0{,}073 \text{ мкф/см}^2.$$

Выбираем ширину анодной фольги 40 *мм* и толщину 0,1 *мм*. Длину фольги в конденсаторе определяем по формуле (5-3)

$$l = \frac{20}{0{,}073 \cdot 4} = 67{,}5 \text{ см}.$$

Катодную фольгу берем шириной $40 + 2 = 42$ *мм* и толщиной 0,01 *мм*. Принимаем волокнистую прокладку из бумаги согласно табл. 38 в два слоя по 100 *мк*, в сумме 200 *мк*, или 0,2 *мм*. Ширину бумаги берем равной $40 + 6 = 46$ *мм*.

Для определения наружного диаметра секции и числа витков определим сечение секции, перпендикулярное ее оси (рис. 146). Толщина секции, развернутой в ленту, определится толщиной анодной

и катодной фольги и двойной толщиной прокладки, т. е. будет равна $0{,}10 + 0{,}01 + 2 \cdot 0{,}2 = 0{,}51$ *мм*.

Длина анода равна 67,5 *см*, но длина всей ленты в секции будет больше за счет холостых витков бумаги в начале и в конце секции (удлинение за счет добавочных витков катодной фольги в конце намотки не учитываем). При диаметре оправки 3 *мм* длина двух витков в начале намотки $\pi \cdot 2 \cdot 0{,}3 = 1{,}9$ *см*; длину одного холостого витка в конце намоткн принимаем ориентировочно $\pi \cdot 2 \approx 6{,}3$ *см*. Тогда длина ленты $67{,}5 + 1{,}9 + 6{,}3 = 57{,}7$ *см*, сечение секции $75{,}7 \cdot 0{,}051 = 3{,}86$ *см*^{2}.

Диаметр секции определяется сечением секции плюс сечение отверстия, образованного при снятии с оправки, $0{,}25\,\pi \cdot 0{,}3^2 = 0{,}07$ *см*^{2}, общая площадь сечения $3{,}86 + 0{,}07 = 3{,}93$ *см*^{2}. Наружный диаметр при таком сечении

$$D = 2\sqrt{\frac{3{,}93}{\pi}} = 2{,}24 \text{ см} = 22{,}4 \text{ мм}.$$

Рис. 146. К расчету поперечного сечения секции.

Разность наружного радиуса и радиуса оправки составит $11{,}2 - 1{,}5 = 9{,}7$ *мм*. Если отнять толщину трех холостых витков бумаги по 0,2 *мм*, то останется $9{,}7 - 0{,}6 = 9{,}1$ *мм*. На этом расстоянии дожно разместиться w витков толщиной по 0,51 *мм*. Тогда $w = 9{,}1 : 0{,}51 \approx 18$. С округленнем принимаем наружный диаметр секции 23 *мм*; высота ее равна 43 *мм*. Схема разверткн секции показана на рис. 147.

При подсчете высоты корпуса надо учесть запасы по высоте на превышение уровня заливки над уровнем торца секции, на воздушный буферный слой, на толщину изоляционной крышкн и на ее закатку

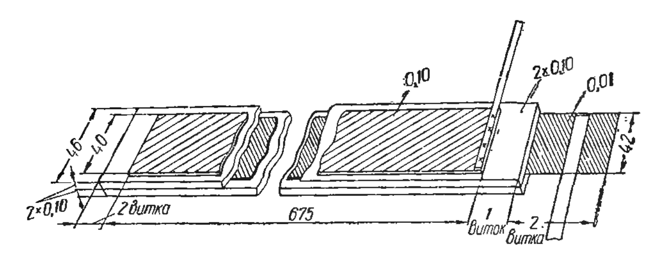


Рис. 147. Схема развертки секции сухого конденсатора.

в корпусе. Принимаем толщину гетинаксовой крышки 3 *мм* и считаем, что на закатку требуется оставить 2 *мм*. Превышение заливки берем на 5 *мм* и воздушный слой 8 *мм*. Тогда получим высоту корпуса $46 + 3 + 2 + 5 + 8 = 64$ *мм*; округляем до 65 *мм*.

Внутренний диаметр корпуса берем на 2 *мм* больше диаметра секции; с учетом толщины стенок корпуса по 0,5 *мм* получаем наружный диаметр корпуса $23 + 2 + 1 = 26$ *мм*. По ГОСТ 5561—50 конденсатор КЭ группы М на 20 *мкф* и 450 *в* имеет высоту 65 *мм* и диаметр 35 *мм*.

Это обусловлено тем, что в период выпуска ГОСТ применялись меньшие значения коэффициентов травления и корпуса подбирались с излишним запасом. В корпусе с диаметром 26 *мм* по ГОСТ предусматривался конденсатор емкостью 10 *мкф* при напряжении 450 *в*.

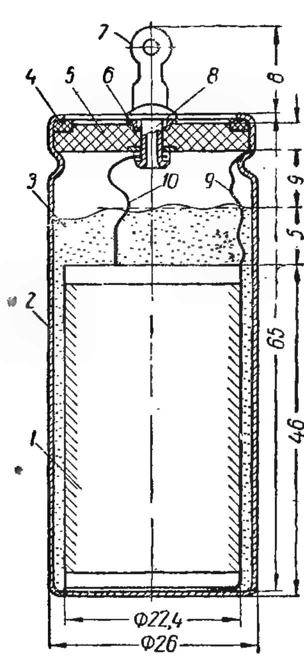


Рис. 148. Сухой электролитический конденсатор КЭ-М (450 *в*, 20 *мкф*):

1 — секция; *2* — корпус, алюминий; *3* — заливка, битум; *4* — прокладка, резина; *5* — крышка, гетинакс; *6* — шайба; *7* — лепесток; *8* — заклепка; *9* — вывод катода; *10* — вывод анода.

Проверим нагрев конденсатора в рабочих условиях, предполагая, что он будет залит битумным компаундом. В данном случае размеры корпуса и секции составляют: $r_0 = 1{,}15$ *см*; $r_1 = 1{,}25$ *см*; $r_2 = 1{,}30$ *см*; $\Delta = 4{,}6$ *см*; $d = 2{,}6$ *см*.

Температуру окружающей среды принимаем равной 60° С, т. е. верхнему пределу рабочей температуры для конденсаторов КЭ. Допускаемый ток утечки по ГОСТ для данного конденсатора при 60° С не должен превышать $I = 0{,}3CU \cdot 10^{-3} + 0{,}1 = 0{,}3 \cdot 20 \cdot 450 \cdot 10^{-3} + 0{,}1 = 2{,}8$ *ма* или $2{,}8 \cdot 10^{-3}$ *а*. Тангенс угла потерь должен быть не выше 0,10.

Частоту переменной составляющей напряжения берем равной 50 *гц*. Величина действующего значения этой составляющей $U_{\sim} = \frac{0{,}1 \cdot 450}{\sqrt{2}} = 31{,}8$ *в*. По формуле (5-5) находим потери

$$P_a = 2{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 450 + 2\pi \cdot 50 \cdot 20 \times 10^{-6} \cdot 31{,}8^2 \cdot 0{,}1 = 1{,}26 + 0{,}64 = 1{,}90 \text{ вт}.$$

При $h = 4{,}3$ *см* и вертикальном расположении конденсатора по рис. 145 находим $\beta = 3{,}3$. Приняв $\gamma = 3{,}31 \cdot 10^{-4}$, по формуле (5-6) находим

$$\Delta t = \left[\frac{19}{\pi \cdot 3{,}3 \cdot 3{,}31 \cdot 10^{-4} \cdot (2{,}6)^{0{,}75} \cdot 4{,}6}\right]^{0.8} = 28{,}6^\circ \text{ С}.$$

Определив температуру перегрева на поверхности корпуса Δt и приняв температуру окружающей среды $t_0 = 60^\circ$ С, по формуле (5-4) определяем максимальную температуру внутри конденсатора

$$t_{\text{макс}} = 60 + 28{,}6 + \frac{1{,}9}{2\pi \cdot 4{,}6}\left(\frac{\ln 1{,}3}{2{,}03} + \frac{2{,}03 - 1{,}4 \cdot 10^{-3}}{2{,}03 \cdot 1{,}4 \cdot 10^{-3}} \cdot \ln 1{,}25 + \frac{1}{2{,}3 \cdot 10^{-4}} - \frac{\ln 1{,}15}{1{,}4 \cdot 10^{-3}}\right) = 88{,}6 + 17{,}6 = 106{,}2^\circ \text{ С}.$$

Температура внутри корпуса конденсатора получилась достаточно высокой и приближающейся к температуре варки электролита (139° С). Однако этот результат не следует считать опасным, как это кажется на первый взгляд. Действительно, в данном случае основную часть

потерь при расчете P_a составили потери от тока утечки, который приняли равным значению, максимально допускаемому по нормам при измерении тока утечки после выдержки конденсатора под напряжением в течение 5 *мин.*

В действительности ток утечки, во-первых, ниже максимально допускаемого значения, а во-вторых, спадает со временем и при длительной работе будет значительно меньше, чем при измерении с выдержкой 5 *мин*. Фактически потери будут раза в 3 меньше расчетного значения и температура перегрева соответственно снизится примерно в таком же отношении. При этом температура внутри конденсатора не будет превышать 75° С, что можно считать допустимым.

Готовый конденсатор показан на рис. 148.

§ 24. НЕПОЛЯРНЫЕ СУХИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

В схемах с питанием от постоянного тока, где можно случайно переменить полярность, следует использовать неполярные электролитические конденсаторы, которые изготовляются подобно обычным полярным электролитическим конденсаторам сухого типа, но с двумя анодами (вместо катодной фольги используется вторая анодная фольга, покрытая таким же слоем оксида, как и первый анод). Емкость конденсатора при этом уменьшается в 2 раза, так как последовательно включаются две одинаковые емкости, соответствующие оксидным слоям на каждом из анодов.

Такой неполярный конденсатор выгоднее, чем система из двух обычных конденсаторов, включенных встречно последовательно, так как имеет меньший объем. Действительно, секции двух полярных конденсаторов будут намотаны из двух анодов, четырех волокнистых прокладок и двух катодов. В неполярном конденсаторе используется только два анода и две волокнистых прокладки.

Рассчитывается такой неполярный конденсатор аналогично полярному. Различие только в том, что при определении размеров анода надо учесть снижение удельной емкости в 2 раза.

Неполярный конденсатор в принципе может работать и при переменном токе, так как при изменении знака напряжения выключается из работы один анод и включается другой, что обеспечивает сохранение небольшой величины тока утечки. Однако нормальному применению подобных конденсаторов в цепи переменного тока мешают их большие потери, вызывающие чрезмерный перегрев конденсатора. В связи с этим электролитический

неполярный конденсатор, пригодный для длительной работы при переменном напряжении, можно изготовить лишь с небольшими значениями номинального напряжения, порядка нескольких десятков вольт, при которых абсолютная величина потерь относительно мала.

На переменное напряжение порядка 110—120 *в* (50 *гц*) электролитические конденсаторы можно изготовить лишь для кратковременного включения в сеть, чтобы конденсатор успевал охладиться до нормальной температуры после разогрева в период включения. Конденсаторы такого типа применяются для пуска однофазных электродвигателей небольшой мощности и называются пусковыми, или стартерными.

При расчете такого конденсатора выбор напряжения формовки для анодов основывается на величине амплитудного значения рабочего напряжения с обычным запасом. Для вычисления $U_ф$ можно воспользоваться формулой

$$U_ф = 1{,}15\sqrt{2}\ U_р, \qquad (5\text{-}8)$$

где $U_р$ — действующее значение рабочего напряжения переменного тока, на которое рассчитывается конденсатор.

Поскольку конденсаторы данного типа обычно не предназначаются для работы при низких температурах, а требования в смысле уменьшения габаритов к ним предъявляются жесткие, при изготовлении этих конденсаторов следует использовать травленую фольгу с большим коэффициентом травления; в формуле (5-1) можно принять $k_{тр} = 5 \div 6$. Учитывая наличие двух анодов, включенных последовательно, величину $k_ф$ надо уменьшить в 2 раза.

Для уменьшения потерь в пусковых электролитических конденсаторах желательно максимально уменьшить сопротивление волокнистой прокладки, включенное последовательно с емкостями оксидных слоев. Это сопротивление определяется формулой

$$r_{пр} = \rho \frac{d_{пр}}{S} \varphi, \qquad (5\text{-}9)$$

где ρ — удельное сопротивление электролита, *ом · см*;
$d_{пр}$ — толщина прокладки, *см*;
S — площадь анода, *см*^{2};
φ — коэффициент проницаемости прокладки.

Таким образом, для снижения потерь надо применять рабочий электролит с пониженным ρ, уменьшать толщину прокладки и φ. Меньшее значение $d_{пр}$ можно получить, применяя бумагу, но она обладает относительно большим значением φ, в 5—6 раз больше, чем для ткани типа марли. Поэтому, хотя ткань имеет несколько бóльшую толщину, чем бумага, ее целесообразно применять в пусковых конденсаторах, так как снижение φ перекрывает увеличение толщины и в результате сопротивление прокладки из ткани будет меньше, чем прокладки из бумаги при одном и том же значении удельного сопротивления электролита.

В остальном расчет и конструирование электролитических пусковых неполярных конденсаторов переменного тока не отличается от расчета обычных полярных сухих конденсаторов.

§ 25. ЖИДКОСТНЫЕ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Электролитические алюминиевые конденсаторы, залитые жидким электролитом (жидкостные или мокрые), в настоящее время практически вышли из употребления и поэтому их расчет можно не рассматривать. В настоящее время начинает широко применяться новый тип электролитического жидкостного конденсатора — танталовый с объемно-пористым анодом, изготовленный спеканием из порошка тантала (конденсатор типа ЭТО). В расчете этого конденсатора основным является определение размеров анода, остальные размеры выбираются из конструктивных соображений. Рассмотрим кратко расчет такого анода, предложенный Л. Н. Закгеймом.

Представим себе спеченный анод в виде таблетки высотой h и площадью основания S, составленной из n слоев зерен порошка тантала (по высоте); предположим, что эти зерна — одинаковые шарики радиусом r, уложенные в каждом слое максимально плотно и образующие между собой точечные контакты. Число слоев таких зерен по высоте таблетки

$$n = \frac{h}{2r}. \quad (5\text{-}10)$$

Число всех зерен в одном слое

$$N = \frac{S}{4r^2}. \quad (5\text{-}11)$$

Общая поверхность всех N зерен в одном слое

$$S_{эфф} = 4\pi r^2 N = \pi S. \qquad (5\text{-}12)$$

Учитывая, что толщина слоя оксида тантала на каждом зерне (шарике) очень мала, можно рассчитать емкость одного слоя зерен, как емкость плоского конденсатора, в котором площадью является суммарная поверхность всех зерен в слое, а толщиной диэлектрика — толщина слоя оксида тантала:

$$C = 0{,}0885 \frac{\varepsilon S_{эфф}}{d} = 0{,}885\pi \frac{\varepsilon S}{d}, \qquad (5\text{-}13)$$

где C — в *пф*, если S — в *см*^{2} и d — в *см*.

Емкость анода в целом можно представить как сумму емкостей всех n слоев, следовательно,

$$C_а = 0{,}0885\pi \frac{\varepsilon Sn}{d} = 0{,}139 \frac{\varepsilon Sh}{rd}. \qquad (5\text{-}14)$$

В данной формуле использовано значение n из формулы (5-10). Толщину слоя оксида тантала можно найти из выражения

$$d = 1{,}68 \; 10^{-7}\, U_ф \; см, \qquad (5\text{-}15)$$

где $U_ф$ — формовочное напряжение, *в*.

Диэлектрическую проницаемость оксида тантала можно принять $\varepsilon = 25$.

Подставив значение d по формуле (5-15) в выражение (5-14), получим, если перейти к выражению C в *мкф*, а не *пф*,

$$C_а = 0{,}83 \frac{\varepsilon Sh}{rU_ф} = 0{,}83 \frac{\varepsilon V_а}{rU_ф}. \qquad (5\text{-}16)$$

Отсюда объем объемно-пористого анода можно найти по формуле

$$V_а = 1{,}2 \frac{C_а r U_ф}{\varepsilon} \; см^3. \qquad (5\text{-}17)$$

Уменьшая радиус зерен r, можно при заданном значении емкости снизить необходимый объем анода. Однако в этом случае, чтобы обеспечить точечный контакт между зернами, надо снижать температуру спекания, а это нежелательно,

так как ослабляется процесс выгорания примесей, имеющихся в тантале, и возрастает ток утечки. Оптимальные результаты получаются, если применять порошок с диаметром зерен порядка десятков микрон.

Зная размеры зерен порошка, который можно использовать (величину r), и выбрав формовочное напряжение $U_ф$ в соответствии с заданным рабочим напряжением конденсатора, по формуле (5-17) находим объем анода и, задавшись его высотой h, определяем площадь основания S, а следовательно, и диаметр анодной таблетки. Остальные размеры конденсатора устанавливаются конструктивно.

Пример. Рассчитать жидкостный танталовый конденсатор с объемно-пористым анодом на рабочее напряжение 30 *в* емкостью 10 *мкф*.

Принимаем формовочное напряжение примерно на 30% выше рабочего:

$$U_ф = 1{,}3\ U_р = 1{,}3 \cdot 30 \approx 40\ в.$$

По формуле (5-17) находим объем анода, предполагая, что среднее значение радиуса зерен составляет 25 *мк* ($25 \cdot 10^{-4}$ *см*),

$$V_а = 1{,}2 \frac{10 \cdot 25 \cdot 10^{-4} \cdot 40}{25} = 4{,}8 \cdot 10^{-2}\ см^3.$$

Выбираем толщину таблетки 0,3 *см* и находим ее диаметр, определив предварительно площадь основания

$$S = \frac{4{,}8 \cdot 10^{-2}}{0{,}3} = 16 \cdot 10^{-2}\ см^2.$$

Диаметр таблетки

$$D = 0{,}1 \sqrt{\frac{4{,}16}{\pi}} = 0{,}45\ см.$$

Полученные размеры таблетки соответствуют принятым сейчас на производстве для первого, наименьшего, габарита конденсаторов типа ЭТО. Для второго габарита применяются таблетки с диаметром 14,6 *мм* и толщиной 3 *мм*.

Конструктивный чертеж конденсатора типа ЭТО показан на рис. 149. На нем введены следующие обозначения: *1* — таблетка (спеченный анод). Он крепится на стержне *2*, приваренном к танталовой пластинке (кружку) *3*; с другой стороны пластинки приварен выводной проводник *4*, другой выводной проводник *9* приварен к дну стального корпуса *7*. В стальной корпус вставлен тонкостенный серебря-

ный корпус *8*, поскольку в конденсаторе используется агрессивный электролит — серная кислота. Для уплотнения служит резиновая шайба *6* из специальной нагревостойкой и химически стойкой резины. На эту шайбу ложится край танталовой пластинки *3* и выступающий край пластмассовой шайбы *5*, отпрессованной из нагревостойкой пластмассы марки АГ-4.

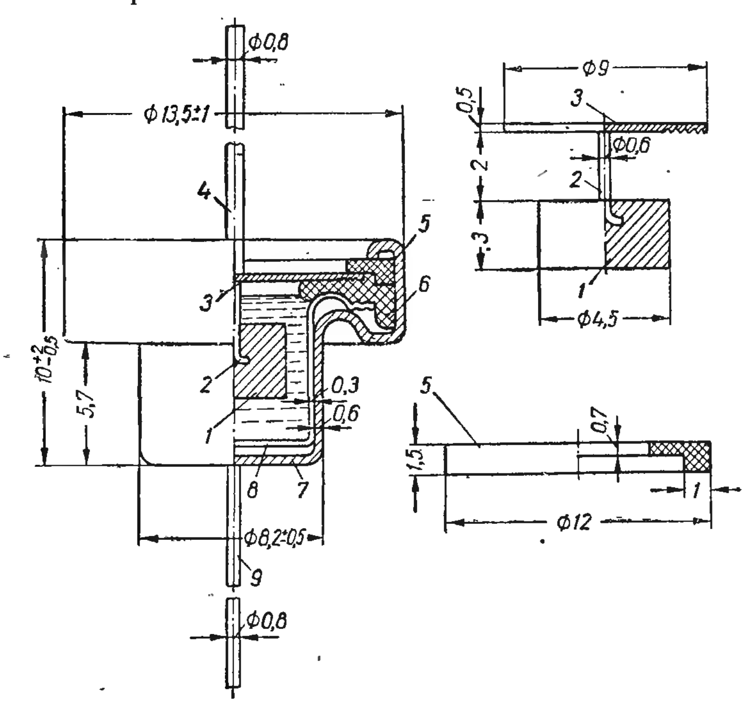


Рис. 149. Танталовый объемно-пористый конденсатор типа ЭТО (30 *в*, 10 *мкф*).

Для изготовления танталовых жидкостных конденсаторов на большое напряжение можно использовать принцип последовательного соединения элементов. Для этого берут нужное число элементарных конденсаторов, подобных изображенному на рис. 149, помещают один над другим в общий цилиндрический корпус и соединяют последовательно. Рабочее напряжение для одного элемента берется равным 90 *в* при рабочей температуре до 70° С. При более высоких

температурах $U_р$ на каждый элемент снижается: при 100° С его принимают равным 70 *в*, а при 200°С — 35 *в*.

Формовочное напряжение для анодов таких элементов принимается равным 120 *в*.

ЛИТЕРАТУРА

1. Закгейм Л. Н., Тепловой расчет электролитического конденсатора, ЖТФ, 1940, X, № 21.

2. Закгейм Л. Н., Расчет плоского анода танталового объемно-пористого конденсатора, ЖТФ, 1957, XXVII, № 8.

3. Закгейм Л. Н., Электролитические конденсаторы, Госэнергоиздат, 1963.

4. Лернер М. М., Конденсаторы на основе оксидной изоляции, «Итоги науки и техники, электротехнические материалы, конденсаторы, провода и кабели», Инст. Н. И. АН СССР, 1964.

5. Vergnolle J., Condensatears an tantale á forte charge et a haute tension, «L'onde éleetuque», 1965, 45, № 462.

ГЛАВА 6

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ С ГАЗООБРАЗНЫМ И ЖИДКИМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

§ 26. ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ

Газообразный и жидкий диэлектрики в отличие от твердого не могут служить опорой для обкладок и обеспечивать определенную величину зазора между ними. Поэтому, если в конденсаторе в качестве диэлектрика используется газ или жидкость, то в его конструкции необходимо предусматривать детали из твердого электроизоляционного материала, с помощью которых можно зафиксировать выбранное значение расстояния между разноименными обкладками конденсатора. При этом обкладки должны иметь достаточную механическую прочность, чтобы при закреплении их твердым диэлектриком лишь в двух-трех точках сохранять форму плоских параллельных пластин или коаксиальных цилиндров при достаточно больших линейных размерах. В связи с этим, если при изготовлении конденсаторов с твердым диэлектриком в качестве обкладок применяют тонкую металлическую фольгу толщиной до 5—6 *мк* или даже очень тонкие металлические слои толщиной до 0,1 *мк*, непосредственно нанесенные на поверхность диэлектрика, то в производстве конденсаторов с газообразным или жидким диэлектриком приходится применять обкладки в виде металлических пластин толщиной от 0,2—0,5 до 2—4 *мм*.

Особенностью газообразных диэлектриков является малое значение угла потерь ($\operatorname{tg}\delta < 1 \cdot 10^{-5}$) при условии, что отсутствует ионизация газа, а также высокая стабильность ε; так, для сухого воздуха температурный коэффициент

диэлектрической проницаемости составляет около -2×10^{-6} *град*$^{-1}$. Обе эти характеристики у твердых диэлектриков обычно значительно хуже, поэтому даже небольшая паразитная емкость через твердый диэлектрик, использованный для крепления обкладок конденсатора с газообразным диэлектриком, может заметно ухудшить электрические характеристики такого конденсатора. В связи с этим, если требуется сконструировать воздушный конденсатор (или конденсатор с иным газообразным диэлектриком) с высокими электрическими свойствами, т. е. с малыми потерями и стабильной емкостью, то следует выбирать для него изоляционные детали крепления пластин из высококачественного твердого диэлектрика с максимально высокими электрическими характеристиками и конструировать эти детали с таким расчетом, чтобы они были вынесены за пределы основного электрического поля между пластинами конденсатора и создавали бы минимальную возможную паразитную емкость.

Жидкие диэлектрики по углу потерь ближе к твердым, а по ТК ε обычно даже хуже твердых, поэтому выбор твердого диэлектрика для крепления пластин в конденсаторах с жидким диэлектриком менее критичен, чем в конденсаторах с газообразным диэлектриком.

Общим недостатком газообразных диэлектриков является их малая диэлектрическая проницаемость, которая для всех газов равна примерно 1; так, например, для сухого воздуха при 20° С $\varepsilon = 1{,}000576$ (при нормальном давлении). Кроме того, даже при низких напряжениях минимальное значение зазора между обкладками относительно велико, порядка 0,2—0,3 *мм*, что обусловлено механическими соображениями о предупреждении возможности перекоса или прогиба пластин, в результате которого может произойти короткое замыкание. В связи с этим удельная емкость конденсаторов с газообразным диэлектриком мала и их невыгодно делать с большими значениями номинальной емкости, так как при этом размеры и вес конденсаторов недопустимо возрастают.

Обычно емкость воздушных конденсаторов низкого напряжения не превышает нескольких сотен пикофарад. При высоком напряжении приходится считаться с низкой электрической прочностью воздуха, которая в однородном поле при зазорах 1—10 *мм* составляет всего лишь 2—3 *кв/мм* (эффективное значение при 50 *гц*). Поэтому в воздушных

конденсаторах высокого напряжения между обкладками необходим очень большой зазор, что дополнительно снижает их удельную емкость. Так, для образцового воздушного конденсатора на рабочее напряжение 400 *кв* было получено значение удельной емкости всего лишь порядка 1 *пф/м*^{3}. Емкость таких конденсаторов обычно не превышала нескольких десятков пикофарад.

В современной технике для конденсаторов высокого напряжения со стабильной емкостью и малыми потерями применяются сжатые газы или вакуум, которые обеспечивают повышение электрической прочности в 10 раз и выше, позволяя соответственно уменьшить величину зазоров между обкладками и резко снизить габаритные размеры конденсаторов.

Емкость таких конденсаторов может достигать нескольких тысяч пикофарад даже при относительно высоких напряжениях. Значение диэлектрической проницаемости в обоих случаях остается по-прежнему порядка единицы, как и у обычного воздуха; это ограничивает возможность дальнейшего увеличения емкости, несмотря на повышение электрической прочности.

Электрическая прочность жидких диэлектриков выше, чем воздуха при нормальном давлении, и ее кратковременные значения достигают величин того же порядка, что и для сжатого газа или вакуума. Однако в связи со старением жидких диэлектриков, в отличие от газовой изоляции, длительно допускаемые значения рабочей напряженности для жидкости будут заметно снижены в сравнении со сжатым газом или вакуумом. Это в значительной степени ослабляет преимущество жидкости в отношении повышенных значений ε. Кроме того, жидкий диэлектрик не может обеспечить столь же малых значений $\operatorname{tg}\delta$ и $TK\varepsilon$, как газовая изоляция, поэтому конденсаторы с жидким диэлектриком мало пригодны для применения в стабильных радиоконтурах или в электроизмерительной технике, где применяются конденсаторы с газообразным диэлектриком. В современном конденсаторостроении применение конденсаторов с жидким диэлектриком ограничивается контурами промышленных высокочастотных установок, но и в этом случае более выгодно применять мощные керамические конденсаторы.

§ 27. ВОЗДУШНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ ПОСТОЯННОЙ ЕМКОСТИ

Воздушные конденсаторы постоянной емкости применяют как образцовые конденсаторы в электроизмерительной технике при значениях емкости порядка нескольких тысяч пикофарад и ниже. Кроме того, в отдельных случаях воздушные конденсаторы постоянной емкости до нескольких сотен, а чаще до нескольких десятков пикофарад применяют в контурах радиопередатчиков небольшой мощности, при относительно небольших напряжениях. Такие конденсаторы изготовляют обычно многопластинчатыми, плоского типа с креплением обеих систем пластин на плате из твердого материала с небольшими потерями (микалекс, керамика), как показано на рис. 150.

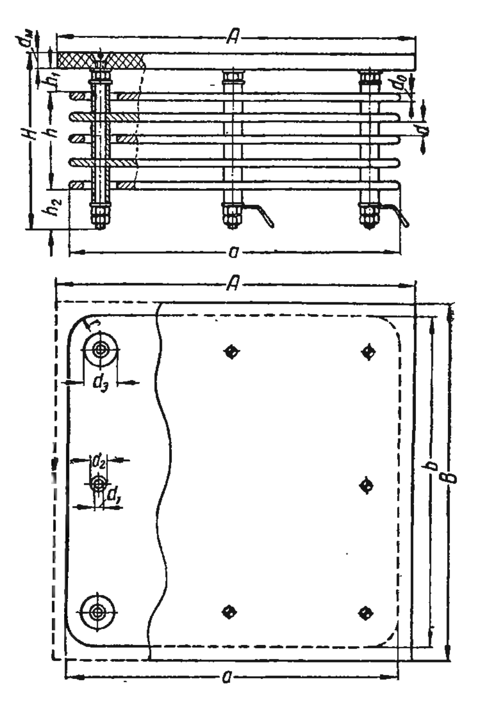


Рис. 150. Воздушный конденсатор постоянной емкости.

Расчет конденсатора такого типа можно начинать с выбора величины зазора, исходя из заданного значения рабочего напряжения и электрической прочности воздуха.

Зависимость электрической прочности воздуха при температуре 20° С и нормальном давлении 760 *мм рт. ст.* от величины зазора при однородном поле показана кривой на рис. 151. Приведенные эффективные значения показывают, что при обычных размерах зазора 1—10 *мм* в однородном поле $E_{пр} = 2 \div 3$ *кв/мм*.

Однако в реальных конденсаторах поле нельзя считать однородным, даже при тщательной полировке поверхности

пластин и закруглении их краев. На рис. 152 приведены экспериментальные результаты определения пробивного напряжения воздуха при давлении 760 *мм рт. ст.* и влажности 60—70% между пластинами конденсатора, подвергнутыми полировке и закруглению углов (указаны амплитудные значения). Для частоты 50 *гц* (верхняя прямая) получены следующие значения (эффективные) пробивной напряженности: при зазоре 2 *мм* — 1,5 *кв/мм*, 5 *мм* —

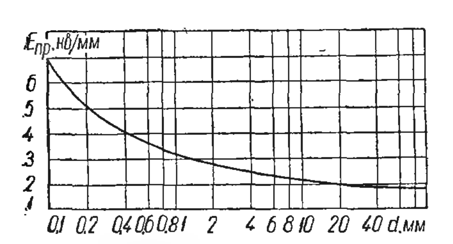


Рис. 151. Кривая зависимости электрической прочности воздуха в однородном поле от величины зазора (эффективные значения, 50 *гц*).

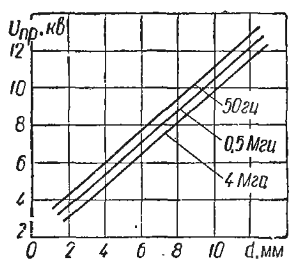


Рис. 152. Кривые зависимости пробивного напряжения воздуха от зазора (амплитудные значения) между пластинами воздушного конденсатора при трех значениях частоты.

1,0 *кв/мм* и 10 *мм* — 0,8 *кв/мм*. Эти цифры соответствуют толщине пластин конденсатора 1—3 *мм*; при более тонких пластинах $E_{пр}$ снижается на 8—12%; в случае отсутствия закруглений на краях пластин электрическая прочность воздуха снижается на 20%. При радиочастотах электрическая прочность снижается на 5—10% при частоте 0,5 *Мгц* и на 10—20% при 4 *Мгц* (большая степень снижения соответствует меньшим зазорам).

Зависимость пробивного напряжения (эффективное значение) от величины зазора при нормальном давлении показана в виде кривой *1* на рис. 153; в этом примере при зазоре от 3 до 0,5 *мм* $E_{пр} = 1{,}5 \div 2{,}5$ *кв/мм*. Кривая *2* на рис. 153 изображает зависимость допускаемого рабочего напряжения (50 *гц*, эффективное значение) от величины зазора; рабочая напряженность поля при меньших зазорах составляет 0,5—0,6 *кв/мм*, а при больших — до 0,44—0,5 *кв/мм*. При особо тщательной полировке пластин и небольших зазорах принимают $E_{пр} = 0{,}7 \div 0{,}8$ *кв/мм*.

Эти данные соответствуют нормальному давлению, т. е. работе конденсатора на высоте уровня моря. Для самолетной аппаратуры приходится учитывать снижение давления воздуха с ростом высоты над уровнем моря. На рис. 153 приведена кривая *3*, изображающая зависимость пробивного напряжения воздуха от зазора при высоте 8 *км*. Практически для авиааппаратуры зазор в воздушных конденса-

Таблица 39

Размеры пластин для воздушных конденсаторов

Диаметр круга или сторона квадрата, *мм*	Площадь пластины, *см²*	
	квадратной	круглой
45	20,25	15,9
55	30,25	23,8
100	100	78,5
200	400	314

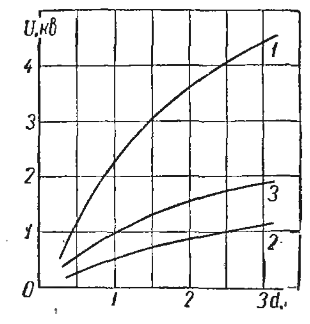


Рис. 153. Кривые зависимости электрической прочности воздуха от зазора между пластинами воздушного конденсатора (эффективные значения):
1 — пробивное напряжение при нормальном давлении; *2* — допускаемое рабочее напряжение при нормальном давлении; *3* — пробивное напряжение на высоте 8 *км*.

торах увеличивают в 1,5—2,5 раза в сравнении с его значением при нормальном давлении.

При установлении размеров выреза в пластинах для прохода болтов, крепящих пластины противоположного знака (а также и расстояния от края пластины до любой токоведущей части, находящейся под полным рабочим напряжением по отношению к данной пластине), надо принимать $E_р$ для воздуха в 2 раза ниже, чем при установлении зазора между пластинами, так как в данном случае поле резко неоднородное.

Если рабочее напряжение конденсатора U *кв*, а выбранное значение напряженности $E_р$ *кв/мм*, то величина зазора

$$d = \frac{U}{E_р} \text{ мм}.$$

Полученное значение округляется в сторону увеличения. При малых напряжениях из конструктивных соображений зазор берут не менее 0,25—0,3 *мм*.

При изготовлении воздушных конденсаторов обычно применяют плоскую многопластинчатую систему обкладок,

используя круглые или квадратные пластины. Размеры пластин указаны в табл. 39.

Используя формулу (1-44) для плоского многопластинчатого конденсатора при $\varepsilon = 1$, находим общую площадь пластин

$$S = S_{пл}M = \frac{C_{н}d}{0{,}0885}\ см^2, \qquad (6\text{-}1)$$

где $C_н$ — номинальная емкость, *пф*;

d — зазор, *см*;

M — общее число зазоров конденсатора (число пластин равно $M+1$).

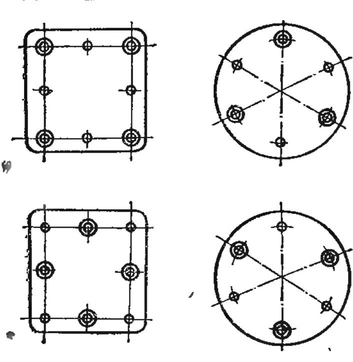


Рис. 154. Расположение вырезов для прохода крепящих болтов в пластинах квадратной и круглой формы.

Вычислив S и выбрав по таблице площадь пластины $S_{пл}$, находим предварительно число пластин конденсатора. Эту величину надо уточнить, так как активная площадь пластин будет уменьшена за счет закругления углов у прямоугольных пластин.

При использовании круглых вырезов (рис. 154), общем числе крепящих болтов (для обеих систем пластин) n и диаметре выреза $d_з$ потеря площади на вырезы

$$\Delta S_1 = 0{,}785\ nd_з^2. \qquad (6\text{-}2)$$

Диаметр выреза в пластине должен быть выбран с таким расчетом, чтобы через него проходил не только крепящий болт диаметром d_1, но и разделительная втулка диаметром d_2 (рис. 155), причем от края пластины до поверхности втулки должно быть расстояние не менее 2 d, где d — зазор между пластинами.

Диаметр крепящих болтов выбирается конструктивно в зависимости от числа и размеров пластин $d_1 = 3 \div 6$ *мм*. Толщина стенок разделительной втулки может быть принята $\Delta = 1{,}5 \div 3$ *мм*.

Тогда диаметр разделительной втулки

$$d_2 = d_1 + 2\Delta, \qquad (6\text{-}3)$$

а диаметр выреза определяется соотношением

$$d_з \geqslant d_2 + 2 \cdot 2d = d_2 + 4d. \qquad (6\text{-}4)$$

Потери площади на закруглении углов прямоугольных пластин при радиусе закругления r

$$\Delta S_2 = 4\left(r^2 - \frac{\pi r^2}{4}\right) = 0{,}86\, r^2. \qquad (6\text{-}5)$$

Радиус закругления в зависимости от размеров пластин можно принять $r = 3 \div 10$ *мм*.

Одновременно с уменьшением за счет вырезов и закруглений активная площадь несколько увеличивается за счет емкости краев пластин, т. е. за счет поля рассеяния, которое не учитывалось в формуле емкости, полученной для однородного поля. Приращение емкости за счет краевого эффекта эквивалентно кажущемуся увеличению размеров пластин. Для прямоугольных пластин это приращение можно принять (на каждую сторону)

$$\Delta a = 0{,}11 d, \qquad (6\text{-}6)$$

что соответствует приращению площади квадратной пластины

$$\Delta S' = (a + \Delta a)^2 - a^2 = \Delta a(2a + \Delta a) = 0{,}11 d(2a + 0{,}11 d), \qquad (6\text{-}7)$$

где a — сторона квадрата, а d — зазор между пластинами.

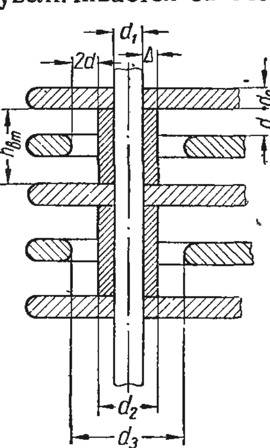


Рис. 155. Крепление пластин воздушного конденсатора с помощью разделительных втулок.

Для круглых пластин приращение диаметра пластин, эквивалентное краевой емкости,

$$\Delta D = 0{,}441 d. \qquad (6\text{-}8)$$

Тогда приращение площади пластины

$$\Delta S'' = \frac{\pi}{4}(D + \Delta D)^2 - \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4}\Delta D\,(2D + \Delta D) = 0{,}346\, d\,(2D + 0{,}441\, d), \qquad (6\text{-}9)$$

где D — диаметр пластины.

Величина активной площади пластины с учетом этих поправок:

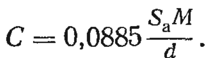
для квадратных пластин

$$S_а = S_{пл} - \Delta S_1 - \Delta S_2 + \Delta S' = S_{пл} - (0{,}785 n d_3^2 + 0{,}36 r^2) + 0{,}11 d\,(2a + 0{,}11 d); \qquad (6\text{-}10)$$

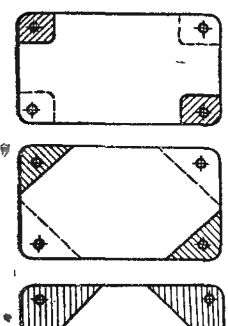
для круглых пластин

$$S_а = S_{пл} - \Delta S_1 + \Delta S'' = S_{пл} - 0{,}785\, n d_з^2 + 0{,}346\, d\,(2D + 0{,}411\, d). \qquad (6\text{-}11)$$

Если вместо круглых вырезов для прохода крепящих болтов применяется скашивание углов пластин, прямоугольные вырезы на углах и т. п. (рис. 156), то активная площадь пластин $S_а$ определяется непосредственно по чертежу как площадь перекрытия пластин противоположного знака; полученное значение площади надо несколько увеличить для учета краевой емкости. Найдя значение $S_а$, проверяем по формуле (1-44) величину емкости конденсатора



$$C = 0{,}0885 \frac{S_а M}{d}.$$



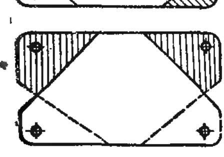


Рис. 156. Вырезы в прямоугольных пластинах и скашивание углов для прохода болтов крепления пластин.

Полученное значение должно отличаться от $C_н$ (от заданной номинальной емкости) не более чем на $\pm \Delta C_н$, т. е. на величину допуска по емкости, оговоренного в задании на расчет конденсатора. Для воздушных конденсаторов, применяемых не в особенно ответственных радиоконтурах, можно принять $\Delta C_н = \pm 10\%$. Если отклонение емкости превышает допустимое, то необходимо изменить число пластин $M + 1$; если требуется лишь немного снизить емкость, то это достигается увеличением зазора между последней парой пластин в сравнении с расчетным значением d (соответственно увеличивают высоту последней разделительной втулки).

Толщина пластин в воздушных конденсаторах рассматриваемого типа $d_0 = 1 \div 3$ *мм* в зависимости от их размеров и от величины зазора. Пластины большого размера изготовляют из алюминия или дюралюминия, меньшего размера — из латуни или стали. Для защиты от коррозии латунные пластины обычно серебрят или никелируют, стальные — цинкуют или кадмируют.

Разделительные втулки обычно изготовляют из латуни, но иногда также из алюминия или стали; стягивающие

болты изготовляют из латуни или стали. Крепятся стягивающие болты на изоляционной плате толщиной 4—10 *мм*, изготовленной из диэлектрика с малыми потерями и механической стабильностью. Платы небольшого размера изготовляют из высокочастотной керамики; при значительных размерах платы, когда обжиг керамики затруднен, применяют микалекс.

Крепление болтов на плате показано на рис. 157. Болты, вставленные в изоляционную плату, создают паразитную емкость через материал платы, которая увеличивает общий угол потерь конденсатора и ухудшает стабильность емкости с температурой. При конструировании конденсатора эту паразитную емкость надо стремиться свести к минимуму, максимально удаляя один от другого болты с разными потенциалами, устраивая выемки в изоляционной плате и т. п.

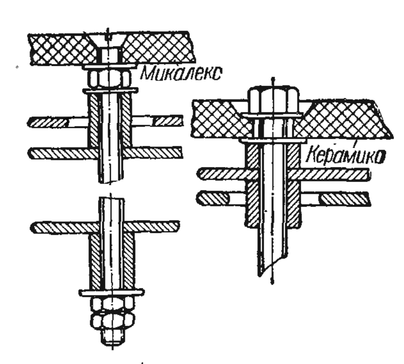


Рис. 157. Крепление болтов в изоляционных платах.

Ток выводится через выводные контакты, зажимаемые под головку одного из крепящих болтов в каждой группе пластин. В конденсаторах небольших размеров на одной из пластин каждой группы иногда делаются специальные ушки, к которым прямо припаиваются соединительные проводники.

Пример. Рассчитать воздушный конденсатор емкостью 250 *пф* для работы при напряжении 1 *кв* (эффективное значение) и частоте 1 *Мгц*; высота над уровнем моря — до 6 *км*.

Согласно указанным выше данным при частоте 1 *Мгц* и нормальном давлении можно принять $E_р = 0{,}4$ *кв/мм*. Тогда зазор был бы $\frac{1}{0{,}4} = 2{,}5$ *мм*. Учитывая, что на высоте 6 *км* давление воздуха и его электрическая прочность снижены, увеличиваем полученное значение зазора в 2 раза (выше указывалось, что при высоте 8 *км* надо было увеличить зазор в 2,5 раза) и получаем величину зазора $d = 5$ *мм* $= 0{,}5$ *см*.

Находим суммарную площадь пластин

$$S = S_{пл}M = \frac{250 \cdot 0{,}5}{0{,}0884} = 1420 \text{ см}^2.$$

По табл. 39 подбираем размер пластин. Берем наибольшую квадратную пластину 200 × 200 *мм* с площадью $S_{пл} = 400$ *см*². Тогда общее число пластин ориентировочно должно быть

$$\frac{1420}{400} + 1 = 4{,}55 \approx 5.$$

Принимаем конструктивно: диаметр крепящих болтов $d_1 = 5$ *мм*; толщину разделительной втулки $\Delta = 2$ *мм*. Диаметр разделительной втулки $d_2 = 5 + 2 \cdot 2 = 9$ *мм*; диаметр выреза в пластинах $d_3 = 9 + 4 \cdot 5 = 29$ *мм*. Радиус закругления пластин принимаем равным 10 *мм*. Уменьшение активной площади за счет вырезов в пластинах при общем числе крепящих болтов $n = 8$

$$\Delta S_1 = 0{,}785 \cdot 8 \cdot 2{,}9^2 = 52{,}8 \ см^2;$$

уменьшение активной площади за счет закругления углов

$$\Delta S_2 = 0{,}86 \cdot 1^2 = 0{,}86 \ см^2;$$

увеличение активной площади за счет краевой емкости

$$\Delta S' = 0{,}11 \cdot 0{,}5(2 \cdot 20 + 0{,}11 \cdot 0{,}5) = 2{,}2 \ см^2.$$

Активная площадь пластины

$$S_а = 400 - 52{,}8 - 0{,}86 + 2{,}2 = 348{,}6 \ см^2.$$

Проверяем величину емкости

$$C = \frac{0{,}0884 \cdot 348{,}6 \cdot (5 - 1)}{0{,}5} = 247 \ пф.$$

Отклонение емкости от номинала

$$\Delta C = \frac{250 - 247}{250} \cdot 100 = 1{,}2\%.$$

Такое отклонение вполне допустимо.

Высота разделительных втулок

$$h_{вт} = d_0 + 2d = 2 + 2 \cdot 5 = 12 \ мм.$$

Толщина пластин (обкладок) $d_0 = 2$ *мм*.

Высота, занятая пластинами (см. рис. 150),

$$h = (M + 1)d_0 + Md = 5 \cdot 2 + (5 - 1) \cdot 5 = 30 \ мм.$$

Полная высота конденсатора (рис. 150)

$$H = h + d_м + h_1 + h_2 = 30 + 10 + 10 + 10 = 60 \ мм.$$

Толщина микалексовой пластины $d_м = 10$ *мм* и $h_1 = h_2 = 10$ *мм*.

Размер пластины конденсатора по табл. 39 принят $a = b = 200$ *мм*.

Конструктивно принимаем размер микалексовой пластины, используемой в качестве изоляционной основы конденсатора (твердый диэлектрик), $A = B = 230$ *мм*.

В тех случаях, когда необходимо получить конденсатор высокого напряжения с небольшой, но стабильной емкостью при малом значении угла потерь, в качестве диэлектрика иногда используется сжатый газ. Конденсаторы такого типа применяются как образцовые малой емкости (обычно 50—100 *пф* при напряжениях до 100—500 *кв*) при высоковольтных измерениях, в частности для мостов Шеринга, а также в виде контурных конденсаторов в мощных радиопередающих устройствах при частотах до нескольких мегагерц, с емкостью до нескольких тысяч пикофарад и с номинальным напряжением до 30—50 *кв*.

Расчет образцового конденсатора цилиндрического типа с наполнением сжатым газом уже описан в литературе. В данной книге рассмотрим расчет контурного конденсатора, который изготовляется обычно плоским многопластинчатым.

Применять сжатый воздух в конструкции конденсаторов нерационально, так как при увеличении давления возрастает абсолютное содержание кислорода внутри конденсатора, что вызывает опасность окисления металлических частей, особенно в условиях разрядов. Поэтому обычно применяют сжатый азот или, реже, углекислоту, электрическая прочность которых того же порядка, что и воздуха.

В условиях неоднородного поля между пластинами конденсатора пробивная напряженность с увеличением давления сначала возрастает линейно, но при давлениях выше 6—7 *ати* рост ее начинает замедляться. При давлении порядка 15—20 *ати* $E_{пр}$ достигает почти установившегося значения. Поэтому при использовании сжатого азота применяют давление не выше 14—15 *ати*. Тогда эффективное значение $E_{пр}$ составляет около 10—12 *кв/мм*.

В настоящее время кроме азота можно использовать также электрически прочные газы фреон CCl_2F_2 и элегаз SF_6. В однородном электрическом поле для этих газов $E_{пр}$ в 2,5 раза выше, чем у азота. Используя электрически прочный газ, можно или повысить пробивное напряжение конденсатора при заданном давлении, или же снизить давление при заданном значении пробивного напряжения и тем облегчить конструкцию.

В отличие от элегаза фреон менее удобен, так как у него температура сжижения равна только —28° С. При

комнатной температуре упругость его паров составляет несколько атмосфер и лишь при 40° С достигает 10 *ата*. Элегаз сжижается при температуре —50° С и при давлении 2,5 *ата*, а при —20° С имеет упругость паров 10 *ата*. При комнатной температуре упругость паров элегаза достигает нескольких десятков атмосфер. Поэтому в технике высоких напряжений чаще применяют элегаз.

При зазоре порядка нескольких миллиметров в газонаполненных конденсаторах обычно выбирают $E_р = 4 \div 5$ *кв/мм* (эффективное значение) при давлении 12—15 *ати* для азота и при давлении 6—8 *ати* для элегаза. Запас электрической прочности для элегаза при этом выше.

Испытательное напряжение можно брать примерно в 1,5 раза выше рабочего, т. е. принимать $E_{исп} = 1,5\ (4 \div 5) = 6 \div 7,5$ *кв/мм*. Это — эффективное значение, которому соответствует амплитуда $\sqrt{2}\, E_{исп}$, т. е. $1,41\ (6 \div 7,5) = 8,5 \div 10,5$ *кв/мм*. Такую напряженность можно применять при испытании конденсатора на пробой постоянным напряжением.

При увеличении давления от 1 до 20 *атм* у азота ε увеличивается только на 1%, поэтому при расчете газонаполненных конденсаторов можно принимать $\varepsilon = 1$.

Схема конструкции контурного высокочастотного газонаполненного конденсатора, предложенная Б. М. Гохбергом и Н. М. Рейновым, показана на рис. 158. Конденсатор плоский, многопластинчатый, с круглыми пластинами. Пластины высокого напряжения *16* крепятся на центральном стержне *21* с применением разделительных втулок *3*; этот стержень изолируется от крышки конденсатора двумя стеклянными полусферами. Нижняя полусфера *6* опирается на выступ стержня *21*; конец стержня выступает из верхней полусферы *11* и заканчивается гайкой *10* и контргайкой *8*, которыми стягиваются обе полусферы. Для присоединения выводного проводника служит закругленная контактная гайка *7*. На стержне над верхней полусферой укрепляется тонкий латунный диск *9* с закругленными краями для выравнивания электрического поля между стержнем и крышкой конденсатора.

Пластины низкого напряжения *15* крепятся на трех боковых стержнях *2*, соединенных с крышкой конденсатора *5*. Таким образом, обе системы пластин монтируются на крышке, а затем опускаются в сварной цилиндрический корпус конденсатора *17*, верхний край которого входит в кольце-

вой вырез крышки. В этот вырез для уплотнения закладывается алюминиевое кольцо *13*. Под края стеклянных полусфер, а также в местах прохода центрального стержня через полусферы ставится уплотнение *12* из нагревостойкой совпреновой резины.

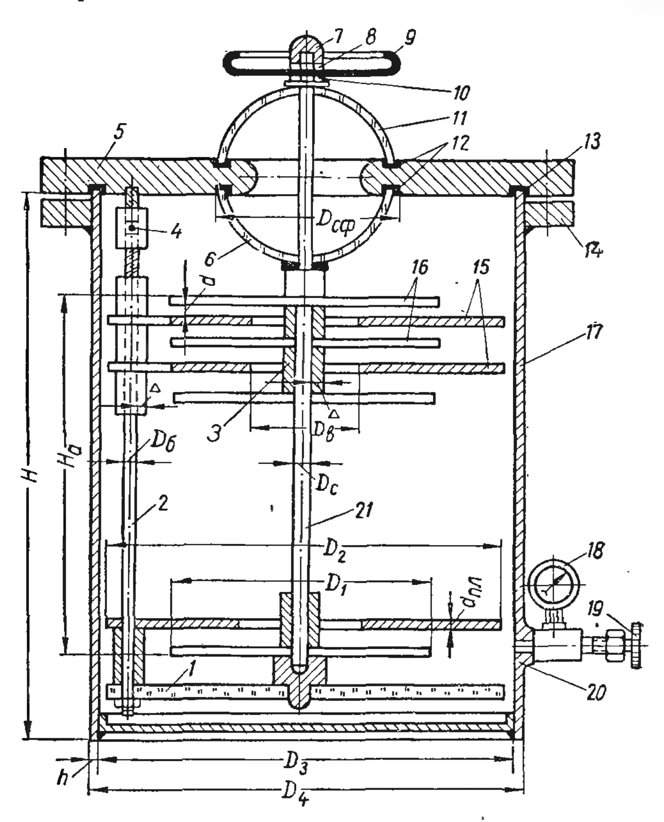


Рис. 158. Конструкция газонаполненного конденсатора (обозначения в тексте).

К наружной поверхности верхней части корпуса приварен фланец *14* для крепления болтов, притягивающих крышку к корпусу. Боковые стержни, крепящие пластины низкого напряжения, соединены с болтами, ввернутыми в крышку с помощью втулок *4* с внутренней нарезкой, имеющей в верхней и нижней частях шаг разного направ-

ления. Эти втулки используются для регулировки зазора между пластинами высокого и низкого напряжений после их сборки на крышке. На выступе *20*, приваренном в нижней части корпуса, установлен кран *19*, используемый для наполнения конденсатора газом и присоединения манометра *18*.

При большом числе пластин в нижней части конденсатора устанавливается диск *1* из стекла или микалекса для закрепления концов стержней *21* и *2*. При небольшой емкости и малом числе пластин этот диск не нужен.

По заданной величине рабочего напряжения и выбранному значению $E_р$ находим величину зазора d; при большом числе пластин зазор обычно берут не ниже 2,5—3 *мм*.

Значения $E_р = 4 \div 5$ *кв/мм* соответствуют рабочей частоте порядка 0,3—0,5 *Мгц*. При более высоких частотах $E_р$ определяется уже не электрической прочностью конденсатора, а допустимым нагревом. Если конденсатор предназначается для работы в некотором диапазоне частот, а не при фиксированной частоте, то указывают испытательное напряжение, соответствующее максимально возможным пикам перенапряжений в условиях эксплуатации. По величине этого напряжения и указанным выше значениям $E_{исп}$ находят зазор и по нему рассчитывают конденсатор, а затем по полученным размерам корпуса определяют зависимость допускаемого напряжения конденсатора от частоты на основе теплового расчета.

Пример. Рассчитать газонаполненный конденсатор с испытательным напряжением 30 *кв* (эффективное значение, 50 *гц*) и емкостью 1000 *пф* для диапазона частот от 10 *кгц* до 5 *Мгц*.

Диэлектриком принят элегаз при давлении 7 *атм*. Если значение $E_{исп} = 7{,}5$ *кв/мм*, то зазор

$$d = \frac{30}{7{,}5} = 4 \text{ мм}.$$

Диаметр пластин высокого напряжения D_1 обычно берут в пределах 200—300 *мм*. Принимаем $D_1 = 200$ *мм*, так как емкость относительно невелика. Для прохода центрального стержня в пластинах низкого напряжения должен быть сделан вырез диаметром $D_в$, определяемым диаметром разделительной втулки *3* (рис. 158), к которому надо прибавить удвоенное значение зазора между краем выреза и поверхностью втулки. Этот зазор, учитывая увеличенную неоднородность поля в этом участке, должен быть взят примерно в 2 раза больше зазора между пластинами.

Принимаем диаметр центрального стержня $d_c = 15$ *мм* и толщину стенок втулки $\Delta = 5$ *мм*. Тогда диаметр выреза

$$D_в = d_c + 2\Delta + 2 \cdot 2d = 15 + 10 + 16 = 41 \text{ мм}.$$

Активная площадь пластин конденсатора

$$S_а = \frac{\pi}{4}(D_1^2 - D_2^2) = \frac{3,14}{4}(20^2 - 4,1^2) = 300 \text{ см}^2.$$

Число пластин конденсатора можно найти по формуле

$$M + 1 = 11,3\frac{Cd}{S_а} + 1 = 11,3\frac{1000 \cdot 0,4}{300} + 1 = 16.$$

Принимаем диаметр боковых стержней $d_б = 10$ *мм*, а толщину втулок на них $\Delta = 5$ *мм*. Между краем пластины высокого напряжения и поверхностью разделительной втулки на боковом стержне надо взять зазор $2d$, т. е. 8 *мм*. Наружный край пластины низкого напряжения должен выступать за край разделительной втулки на 5—10 *мм*. Учитывая все эти данные, получаем величину диаметра пластины низкого напряжения

$$D_2 = D_1 + 2d + 2\Delta + d_б + (5 \div 10) = 200 + 8 + 10 + 10 + (5 \div 10) = (223 \div 238) \text{ мм}.$$

Принимаем $D_2 = 235$ *мм*. Внутренний диаметр корпуса конденсатора надо выбрать на 10—15 *мм* больше диаметра D_2, чтобы обеспечить удобства сборки.

Принимаем $D_3 = D_2 + 10 = 245$ *мм*.

Для определения толщины стенок конденсатора рассматриваем корпус конденсатора как цилиндрическую оболочку, находящуюся под равномерным внутренним давлением $p = 8$ *ати* или 0,08 *кГ/мм*². В направлении образующей цилиндра возникает напряжение

$$\sigma_1 = \frac{pR}{2h} \text{ кГ/мм}^2,$$

где h — толщина стенки и R — внутренний радиус цилиндра, в данном случае $R = 0,5D_3 = 122,5$ *мм*.

В перпендикулярном направлении напряжение будет в 2 раза больше, т. е.

$$\sigma_2 = \frac{pR}{h}.$$

На это напряжение и рассчитывается стенка. Приняв допускаемое напряжение 20 *кГ/мм*², получим

$$h = \frac{pR}{\sigma_2} = \frac{0,08 \cdot 122,5}{20} = 0,49 \text{ мм}.$$

Из конструктивных соображений принимаем $h = 4$ *мм*. При этом учитывается также и то, что проверку прочности корпуса проводят не меньше, чем при двойном рабочем давлении.

Наружный диаметр корпуса конденсатора

$$D_4 = D_3 + 2h = 245 + 8 = 253 \text{ мм}.$$

Активная высота конденсатора определяется числом и величиной зазоров и суммарной толщиной пластин. В таких конденсаторах применяют пластины толщиной 3—4 *мм*. Берем $d_{пл} = 4$ *мм*. Тогда активная высота

$$H_а = Md + (M + 1)d_{пл} = 15{,}4 + 16 \cdot 4 = 124 \text{ мм}.$$

Диаметр полусфер можно выбрать с учетом того, что при $D_{сф} = 80$ *мм* получали напряжение испытания 10—12 *кв*, а при $D_{сф} = 160$ *мм* — до 30—40 *кв*. В данном случае берем $D_{сф} = 160$ *мм*. Внутри корпуса конденсатора, кроме нижней полусферы и активной высоты, надо предусмотреть зазор между концами стержней, крепящих пластины, и дном конденсатора, размеры нижнего диска и т. п. Практически высота корпуса

$$H = H_а + \frac{D_{сф}}{2} + (60 \div 80) = 124 + 80 + (60 \div 80) = 264 \div 284 \text{ мм}.$$

Принимаем $H = 270$ *мм*.

Толщину крышки конденсатора и толщину фланца для крепления крышки болтами принимают 15—20 *мм*. Для крепления крышки следует взять 10—12 болтов диаметром 10—15 *мм*; размеры и число болтов надо проверить расчетом на механическую прочность.

Боковая поверхность конденсатора, которая принимается в расчет при определении теплоотдачи в окружающую среду,

$$S_{охл} = H\pi D_4 = 27 \cdot 3{,}14 \cdot 25{,}3 = 2140 \text{ см}^2.$$

Если принять в первом приближении коэффициент теплоотдачи $\alpha_т = 1 \cdot 10^{-3}$ *вт/см²·град* и допустимый перегрев конденсатора $\Delta t = 40°$ С, то допускаемое значение потерь в конденсаторе

$$P_а = \alpha_т S_{охл} \Delta t = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 2140 \cdot 40 = 85{,}6 \text{ вт}.$$

Принимаем, что до частоты 0,5 *Мгц* $\operatorname{tg}\delta = 1 \cdot 10^{-4}$, при дальнейшем увеличении частоты значение $\operatorname{tg}\delta$ линейно возрастает за счет потерь в металлических частях конденсатора. Поэтому при частоте 0,5 *Мгц* допускаемая реактивная мощность по нагреву $P_р = \frac{85{,}6}{10^{-4}} = 856\,000$ *вар* = 856 *квар*.

Рабочее напряжение, допускаемое при этой частоте из соображений нагрева,

$$U_{раб} = \sqrt{\frac{P_р}{\omega C}} = \sqrt{\frac{856 \cdot 10^3}{6{,}28 \cdot 0{,}5 \cdot 10^6 \cdot 1000 \cdot 10^{-12}}} = 1{,}85 \cdot 10^4 \text{ в} = 18{,}5 \text{ кв}.$$

По электрической прочности можно было бы допустить рабочее напряжение

$$U_{раб} = \frac{U_{исп}}{1{,}5} = \frac{30}{1{,}5} = 20 \text{ кв}.$$

По условиям нагрева такое напряжение допустимо только при снижении частоты до значения

$$f = \frac{(P_р)_{доп}}{2\pi U^2_{раб} C} = \frac{856 \cdot 10^3}{6{,}28 \cdot 20^2 \cdot 10^6 \cdot 10^{-9}} = 0{,}34 \cdot 10^6 \textit{ гц}.$$

Таким образом, от частоты 10 *кгц* до 0,34 *Мгц* допускаемое напряжение на конденсаторе определяется электрической прочностью и равно 20 *кв*. Реактивная мощность при этом возрастает от $6{,}28 \cdot 10^4 \cdot 20^2 \cdot 10^6 \times \times 10^{-9} = 25$ *квар* при 10 *кгц* до 856 *квар* при 0,34 *Мгц*. В пределах частоты от 0,34 до 0,5 *Мгц* реактивная мощность конденсатора сохраняется постоянной и равной 856 *квар*, а напряжение снижается до 18,5 *кв*. Если предположить, что при дальнейшем увеличении частоты до 5 *Мгц* $\operatorname{tg}\delta$ линейно возрастает, то при частоте 5*Мгц* он будет равен $1 \cdot 10^{-4} \frac{5}{0{,}5} = 10 \cdot 10^{-4}$, т. е. соответственно увеличится в 10 раз. При неизменном значении допустимого нагрева (85,6 *вт*) реактивную мощность конденсатора придется снизить также в 10 раз, т. е. принять равной 85,6 *квар*. Рабочее напряжение конденсатора при частоте 5 *Мгц*

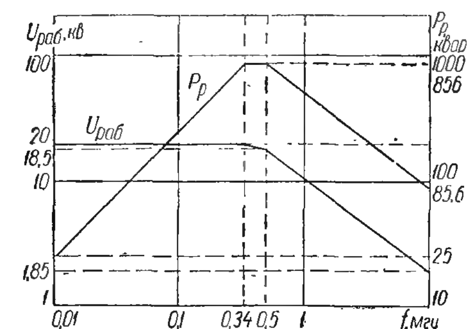


Рис. 159. Кривые зависимости допускаемого напряжения и реактивной мощности газонаполненного контурного конденсатора от частоты.

$$U_{раб} = \sqrt{\frac{85{,}6 \cdot 10^3}{6{,}28 \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 10^{-9}}} = 1{,}85 \cdot 10^3 \textit{ в} = 1{,}85 \textit{ кв}.$$

Графическое изображение изменения допускаемых значений реактивной мощности и рабочего напряжения для спроектированного конденсатора от частоты представлено на рис. 159. Оптимальное использование конденсатора при максимальном значении допускаемой реактивной мощности 856 *квар* возможно в диапазоне частот от 0,3 до 0,5 *Мгц*.

Объем корпуса спроектированного конденсатора (без учета верхней полусферы)

$$V = \frac{\pi D_4^2}{4} H = \frac{3{,}14 \cdot 25{,}3^2 \cdot 27}{4} = 13\,600 \textit{ см}^3.$$

При этом максимальная удельная реактивная мощность

$$p_{уд} = \frac{856\,000}{13\,600} = 63 \textit{ вар/см}^3.$$

Как показано на рис. 159, в области высоких частот, выше 0,5 *Мгц*, величина $P_р$, а следовательно, и удельная мощность резко падают. Поэтому в области коротких волн газонаполненные конденсаторы фактически вытеснены вакуумными конденсаторами. В настоящее время и при более длинных волнах газонаполненные конденсаторы заменяются или новыми типами вакуумных конденсаторов большой емкости (1000—5000 *пф*), или мощными высокочастотными керамическими конденсаторами.

§ 29. ВАКУУМНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

В последние годы вакуумные конденсаторы широко применяются в высоковольтной высокочастотной радиоаппаратуре. Используя вакуум в качестве диэлектрика в высоковольтных конденсаторах, получаем ряд преимуществ по сравнению с другими типами таких конденсаторов — воздушными, газонаполненными, керамическими, слюдяными и др.

Вакуумный диэлектрик обладает свойствами самовосстановления после единичных пробоев при перегрузках по напряжению. Вследствие высокой электрической прочности вакуума можно резко уменьшить межэлектродные расстояния и, следовательно, уменьшить габаритные размеры вакуумных конденсаторов по сравнению с воздушными и газонаполненными в диапазоне емкостей от единицы до тысяч пикофарад при напряжениях от единиц до сотен киловольт.

В вакууме практически отсутствуют диэлектрические потери, поэтому $\operatorname{tg}\delta$ конденсатора составляет очень малую величину и определяется только омическими потерями в электродах и диэлектрическими потерями в баллоне конденсатора. Вследствие этого вакуумные конденсаторы могут работать на высоких частотах (порядка сотен мегагерц) при больших удельных реактивных нагрузках (десятки и сотни ампер). Диэлектрическая проницаемость вакуума равна единице и совершенно не зависит от температуры, частоты, приложенного напряжения и других факторов. Таким образом, вакуум обладает высокой электрической прочностью, стабильностью ε, самовосстанавливается после пробоя. При правильном выборе конструкции и материалов и тщательно отработанной технологии можно получить вакуумные конденсаторы, имеющие при небольших габаритных размерах наилучшие электрические параметры

по сравнению со всеми существующими типами высоковольтных высокочастотных конденсаторов.

Вакуумные конденсаторы постоянной емкости применяются в мощных передатчиках, высоковольтных генераторах индукционного и диэлектрического нагрева и в других высоковольтных высокочастотных установках (контурные конденсаторы промежуточных и оконечных каскадов, конденсаторы связи, фильтровые конденсаторы, нейтродинные и разделительные в сеточных, анодных и других высоковольтных и высокочастотных цепях, а также накопительные конденсаторы в мощных формирующих линиях).

Конструкции вакуумных конденсаторов постоянной емкости. При выборе конструкции вакуумных конденсаторов постоянной емкости руководствуются необходимостью обеспечения:

а) заданных значений электрических параметров (емкости, напряжения и высокочастотного тока) при минимально возможных габаритных размерах;

б) достаточной механической прочности и способности противостоять различным климатическим факторам;

в) технологичности конструкции.

На рис. 160 представлены конструкции вакуумных конденсаторов постоянной емкости, выпускаемых отечественной промышленностью.

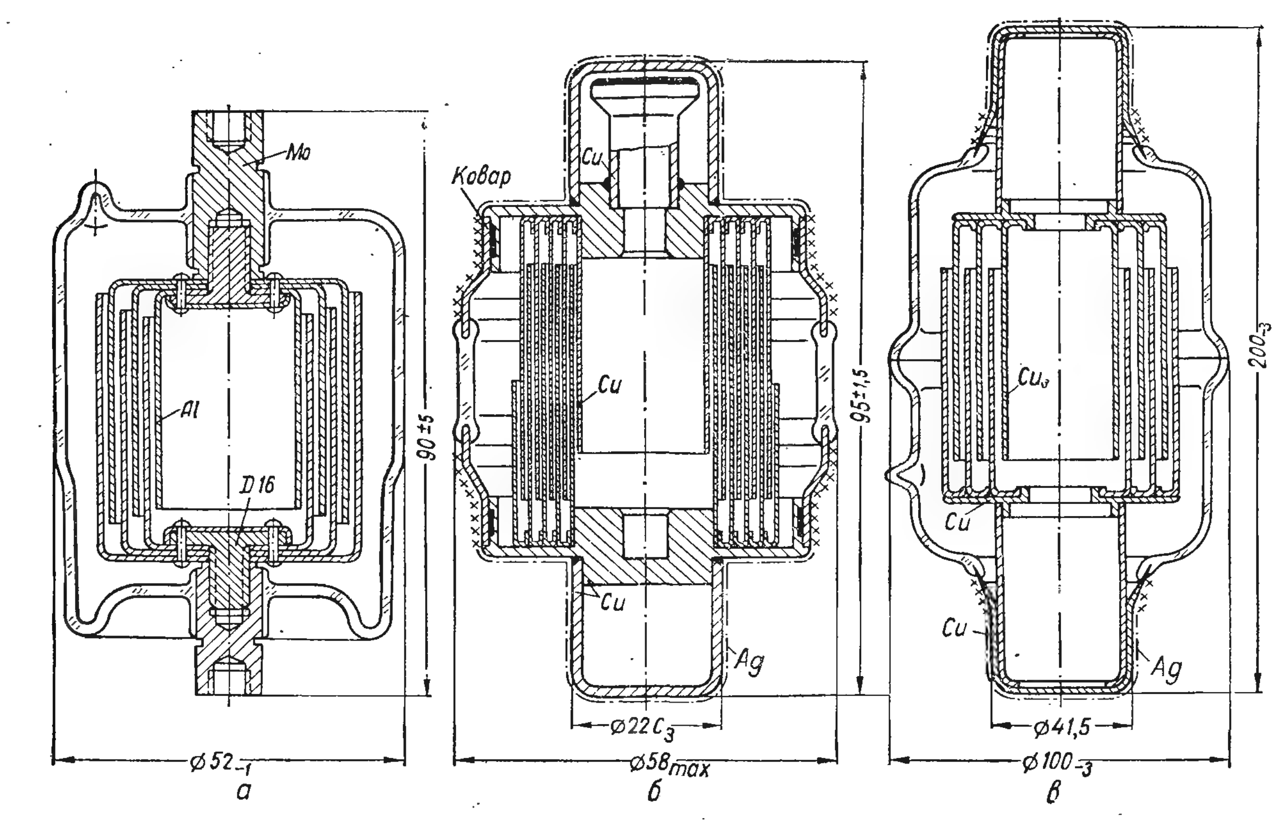
Электроды вакуумных конденсаторов имеют цилиндрическую форму, обеспечивающую достаточную удельную емкость конденсатора, равномерность электрического поля, жесткость конструкции. Электроды изготовляются из никеля, алюминия, чаще меди, обладающей высокими значениями электро- и теплопроводности, хорошими вакуумными свойствами.

Величина межэлектродного зазора определяется напряжением конденсатора и находится в пределах от 0,5 до 4,5 *мм* для конденсаторов на напряжения от 3 до 60 *кв*.

Электроды каждого из пакетов припаиваются (в конденсаторах типа ВМ крепятся с помощью клепки, рис. 160,*а*) к основаниям, которые присоединяются непосредственно или через соединительные детали к выводам. Выводы спаиваются со стеклянной оболочкой, выполняемой из электровакуумных стекол марок С-49-8 (ЗС-8) или С-49-5к с хорошими электрическими свойствами, высокой термостойкостью и способностью давать согласованные спаи с молибденовыми и коваровыми выводами. Конструкция конденсатора

Рис. 160. Конструкции вакуумных конденсаторов постоянной емкости:

а — ВМ, 100 *пф*, 10 *кв*, 12 *а*, 25 *Мгц*; *б* — К61-3, 300 *пф*, 5 *кв*, 25 *а*, 30 *Мгц*; *в* — К61-1, 150 *пф*, 25 *кв*, 30 *Мгц*.



с молибденовыми выводами представлена на рис. 160, *а*, а с коваровыми и медными выводами — на рис. 160, *б* и *в*.

Величина тока, проходящего через вакуумный конденсатор, определяется в основном допустимой температурой разогрева спая стекла с выводом конденсатора, которая обычно не должна превышать 150° С. Применяя медные выводы (рис. 160, *в*), можно пропускать через конденсатор значительно большие токи, чем при использовании молибдена или ковара.

Все вакуумные соединения деталей и узлов конденсатора выполняются твердыми припоями с высокой температурой плавления и низким давлением насыщенных паров (припои ПСр15ф5, ПСр72, ПСр50). Для получения вакуумплотных спаев применяется также аргонодуговая сварка.

Расчет вакуумных конденсаторов

Исходными данными для расчета вакуумных конденсаторов являются: величина рабочего напряжения, емкость, ток при заданной частоте, температура окружающей среды и величина атмосферного давления, при котором может быть использован конденсатор. Конструктивные размеры вакуумного конденсатора обусловливаются:

расстоянием между электродами и длиной цилиндров, которые должны обеспечивать расчетное напряжение и емкость;

длиной внешней части стеклянной оболочки, которая должна выдерживать расчетное значение напряжения при заданном атмосферном давлении;

формой оболочки и ее размерами, которые не должны допускать больших потерь в ней при работе конденсатора на высоких частотах;

конструкцией выводов, которые должны обеспечивать пропускание расчетного тока без опасного перегрева.

Основным фактором, влияющим на электрическую прочность конденсатора, является величина зазора между электродами. Пробивная напряженность зависит от качества обработки поверхности электродов, материала их, величины емкости конденсатора и конструктивных его особенностей. Величины пробивных напряженностей конденсаторов одинаковой конструкции и емкости с алюминиевыми и медными электродами практически равны и приблизительно в 1,5 раза меньше пробивной напряженности конденсатора

с никелевыми электродами. Напряженность поля междуэлектродного зазора при испытательном напряжении (амплитудное значение) обычно выбирается в пределах 15—20 *кв/мм*.

Расстояние между торцами электродов пакета и основаниями зависит от междуэлектродного зазора d и выбирается исходя из соотношения $l_т = (3 \div 4)d$.

Толщина электродов выбирается в зависимости от конструкции конденсаторов, величины его напряжения и емкости. Для конденсаторов напряжением до 5 *кв* толщина электродов принимается равной 0,25 *мм*, для конденсаторов напряжением свыше 5 *кв* — 0,5 *мм*.

Длина оболочки вакуумных конденсаторов выбирается такой, чтобы при заданных величинах напряжения и атмосферного давления между выводами конденсатора по поверхности оболочки не наблюдалось перекрытия. Обычно минимальная длина оболочки конденсатора определяется величиной испытательного напряжения при давлении 400 *мм рт. ст.* из расчета 4—5 *кв* на 1 *см* (амплитудное значение). Испытательное напряжение вакуумных конденсаторов выбирается равным $(1{,}2 \div 1{,}4)\ U_р$.

Исходя из длины стеклянной оболочки $l_{ст}$, выбирается длина электродов $l_э$ с учетом зазора $l_т$ между торцами электродов пакетов и основаниями. Для различных конструкций конденсаторов диаметр электродов выбирается из конструктивных соображений. Диаметр наименьшего электрода в зависимости от конструкции принимается равным 15—20 *мм*. Дальнейшее увеличение диаметра нецелесообразно ввиду незначительного выигрыша по емкости.

Для определения количества электродов в конденсаторе заданной емкости при выбранных величинах междуэлектродного зазора, длины электродов, их толщины и диаметра наименьшего электрода рассчитывается емкость для каждой последующей пары электродов. Емкости добавочных электродов после второго суммируются и подбирается количество электродов в пакетах для получения заданной емкости. Емкость между двумя коаксиальными цилиндрами рассчитывается по формуле (1-41), причем для вакуума принимается $\varepsilon = 1$.

Однако в формуле (1-41) не учитывается торцовая емкость, величина которой зависит от числа электродов, их толщины и торцового зазора между пакетами электродов и основаниями. Поэтому расчетная емкость получится несколько меньше фактической.

На рис. 161 представлены кривые зависимости емкости пакетов конденсаторов длиной 10 *мм* от числа электродов в пакетах при различных междуэлектродных зазорах и толщинах электродов. По этим кривым можно быстро определить количество электродов n и внешний диаметр наружного электрода

$$D_{н} = 2(n - 1)(d + d_0) \text{ мм}. \tag{6-12}$$

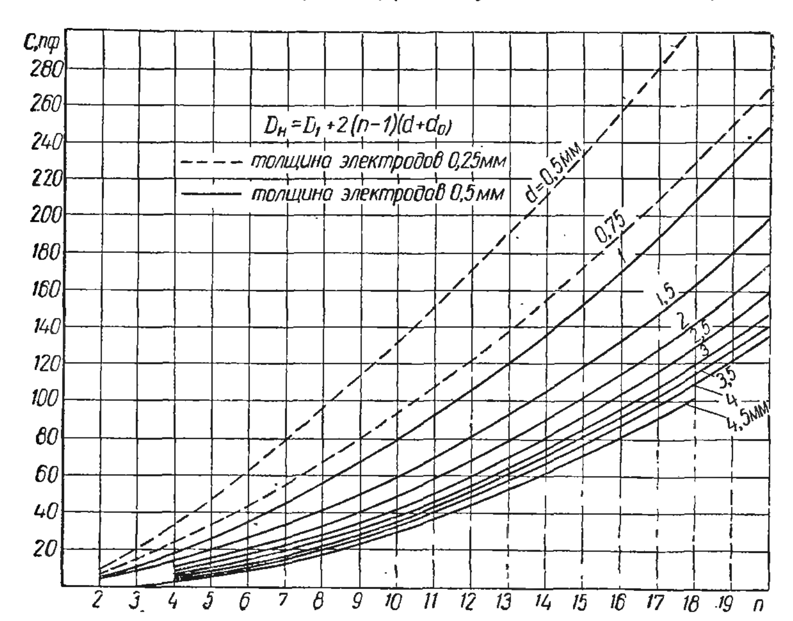


Рис. 161. Кривые зависимости емкости пакетов конденсаторов длиной 10 *мм* от числа электродов в пакетах.

Обычно рассчитанная по формуле (1-41) емкость конденсатора уточняется при макетировании. После определения количества электродов в пакетах и величины диаметра внешнего цилиндра выбирается диаметр стеклянной колбы. Расстояние между наружной поверхностью внешнего цилиндра и внутренней поверхностью колбы не должно быть для конденсатора с заданным рабочим напряжением меньше величины, определяемой графиком, представленным на рис. 162.

Диаметр вывода определяется величиной расчетного тока. Экспериментально установлено, что для обеспечения

нормальной работы конденсатора при естественном охлаждении плотность высокочастотного тока, проходящего через вывод в месте спая стекла с металлом, должна быть не более $j = 30 \div 35$ *а/мм*^{2} (для медных выводов).

Эффективная глубина проникновения электромагнитной энергии в металл определяется соотношением

$$\beta = 500 \sqrt{\frac{\rho}{f\mu}}\ мм, \qquad (6\text{-}13)$$

где ρ — удельное сопротивление, *ом · мм*^{2}*/м*;

f — частота, *гц*;

μ — магнитная проницаемость.

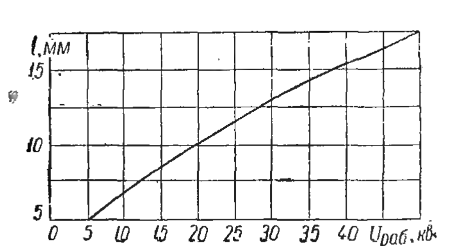


Рис. 162. Кривая зависимости минимального расстояния между стеклянной колбой (стекло С-49-8) и наружным электродом от рабочего напряжения конденсатора (при частоте 30 *Мгц*).

Диаметр вывода в месте спая стекла с металлом определяется по формуле

$$D = \frac{I}{\pi\beta j}\ мм, \qquad (6\text{-}14)$$

где I — заданная величина тока, *а* (эфф.);

j — выбранное значение плотности тока, *а/мм*^{2}.

Диаметр самого вывода и длина его определяются удобством крепления конденсатора, а при больших токах — необходимостью увеличения теплоотвода.

Расчет потерь в конденсаторе. При правильно выбранных размерах и форме изоляционной оболочки вакуумного конденсатора, когда потери от высокочастотного поля в ней незначительны, общие потери в конденсаторе складываются из потерь в электродах, соединительных деталях (если они есть) и выводах.

Потери в поверхности электродов, образующих емкость конденсатора, с учетом изменения тока по длине электродов определяются выражением

$$P_э = 2\frac{I^2\rho l}{\pi\beta C_2}\left[\frac{C_1^2}{3D_1} + \frac{C_1^2 + C_1C_2 + \frac{C_2^2}{3}}{D_2} + \right.$$

$$\left. + \frac{C_{1-2}^2 + C_{1-2}C_3 + \frac{C_3^2}{2}}{D_3} + \cdots + \frac{C_{1-(n-1)} + C_{1-(n-1)}C_n + \frac{C_n^2}{3}}{D_n}\right].$$

Пренебрегая величинами второго порядка (кроме первого члена в скобках), получим

$$P_э = 2\frac{I^2 \rho l}{\pi \beta C_\Sigma^2}\left(\frac{C_1^2}{3D_1} + \frac{C_1 C_{1-2}}{D_2} + \frac{C_{1-2}C_{1-3}}{D_3} + \cdots + \frac{C_{1-(n-1)}C_\Sigma}{D_n}\right), \tag{6-15}$$

где I — заданный ток, *а* (эфф.);
ρ — удельное электрическое сопротивление, *ом · мм²/мм*;
l — длина электродов, *м*;
β — эффективная глубина проникновения электромагнитной энергии в металл, *мм*;
$D_1, D_2, \ldots, D_n$ — средний диаметр первой, второй, n-й пары электродов, *мм*;
$C_1, C_2, \ldots, C_n$ — емкость, образуемая первой, второй, n-й парой электродов, *пф*;
$C_{1-2}, C_{1-(n-1)}$ — суммарная емкость, образуемая первой, второй, n — 1-й парой электродов;
C_Σ — суммарная емкость конденсатора, *пф*.

Потери во внешней цилиндрической части последнего электрода, в цилиндрических соединительных деталях и выводах определяются по формуле

$$P_ц = \frac{I^2 \rho l}{\pi \beta D}\ вт, \tag{6-16}$$

где l — длина цилиндрической детали, *м*;
D — внешний диаметр детали, *мм*.

Потери в деталях дисковой формы определяются по формуле

$$P_д = \frac{I^2 \rho}{2\pi\beta}\ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right) вт, \tag{6-17}$$

где ρ — удельное сопротивление, *ом · мм*;
D_2 — наружный диаметр диска, *мм*;
D_1 — внутренний диаметр диска, *мм*.

Суммарные потери P_Σ в арматуре конденсатора складываются из потерь в электродах, соединительных деталях и выводах.

После расчета потерь в конденсаторе рассчитывается теплоотдача его при естественном воздушном охлаждении. Для ориентировочных расчетов принимается коэффициент теплоотдачи $\alpha_т = 1 \cdot 10^{-3}$ *вт/см² · град*.

Для вакуумных конденсаторов температура перегрева $\Delta t = t_к - t_⊙$ принимается равной 50—60° С.

При установившемся тепловом режиме конденсатора мощность теплоотвода определяется формулой (1-118). Для упрощения можно принять, что в установившемся режиме температура поверхности изоляционной оболочки и выводов одинакова.

Для работы без превышения принятого значения перегрева конденсатора необходимо, чтобы $P_а = P_\Sigma$.

Следует учесть, что при таком расчете не учитывается теплоотвод за счет контактирующих зажимов конденсатора. Правильность выбора геометрии проверяется испытанием образцов конденсаторов на высокочастотный ток при макетировании.

Пример. Рассчитать вакуумный конденсатор со следующими исходными данными: $U_{раб} = 20$ *кв* (амплитудное значение), $C = 500$ *пф*, $I = 75$ *а* (эфф.) при частоте 30 *Мгц*, $t_⊙ = 50°$ С.

Конденсатор должен работать при атмосферном давлении 400 *мм рт. ст.* Испытательнсе напряжение конденсатора

$$U_{исп} = 1{,}4\ U_{раб} = 28\ кв.$$

Ввиду значительного тока, протекающего через конденсатор, выбираем медные электроды.

Приняв $E_{исп} = 20$ *кв/мм*, определяем междуэлектродный зазор

$$d = \frac{U_{исп}}{E_{исп}} = \frac{28}{20} = 1{,}40\ мм.$$

Примем зазор $d = 1{,}5$ *мм*.

Расстояние между торцами электродов пакета и основаниями

$$l_т = 3d = 4{,}5\ мм.$$

Толщину электродов выбираем равной $d_0 = 0{,}5$ *мм*.

Минимальная длина оболочки

$$l_{ст} = \frac{28}{4{,}5} = 6\ см = 60\ мм.$$

Выбираем длину электродов равной $l_э = 35$ *мм*.

Наружный диаметр внутреннего электрода выбираем

$$D_{1,\ н} = 20\ мм.$$

Рабочая длина электродов

$$l = 55 - 4{,}5 = 50{,}5\ мм.$$

На 1 *см* длины электродов конденсатора приходится емкость

$$C = \frac{500}{5{,}05} = 100\ пф.$$

С помощью графика (рис. 160) определяем, что при зазоре 1,5 *мм* и толщине электродов 0,5 *мм* для получения емкости 100 *пф* необходимо иметь количество электродов среднее между 13 и 14. Так как реальная емкость конденсатора всегда больше расчетной, принимаем количество электродов 13.

Внешний диаметр наружного электрода

$$D_{13,\text{н}} = 20 + 2(13 - 1)(1,5 + 0,5) = 68 \text{ мм}.$$

В соответствии с графиком на рис. 162 при напряжении 20 *кв* расстояние между наружным электродом и стеклянной оболочкой должно быть не менее 10 *мм*. Выбрав это значение и толщину стеклянной оболочки 2,5 *мм*, получаем внешний диаметр стеклянной колбы 93 *мм*.

Для определения диаметра вывода в месте спая стекла с металлом определим эффективную глубину проникновения высокочастотного тока в металл по формуле (6-13). Для бескислородной меди $\rho = 0,0156$ *ом·мм²/м*, $\mu = 1$, на частоте 30 *Мгц* $\beta = 500\sqrt{\dfrac{0,0156}{30 \cdot 10^6}} = 11,4 \cdot 10^{-3}$ *мм*.

Задавшись максимальной плотностью тока $j = 30$ *а/мм²*, определяем по формуле (6-14) диаметр вывода в месте спая стекла с металлом

$$D_\text{в} = \frac{75}{\pi \cdot 12,4 \cdot 10^{-3} \cdot 30} = 64 \text{ мм}.$$

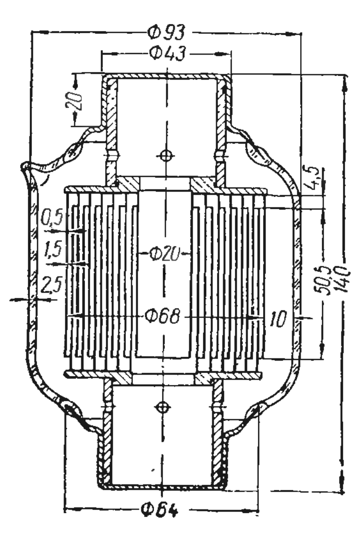


Рис. 163. Конструкция конденсатора ($U = 20$ *кв*, $C = 500$ *пф*).

На рис. 163 представлена конструкция рассчитываемого конденсатора. Электроды припаиваются к основаниям, толщина которых выбрана 3 *мм*. С помощью соединительных медных стаканов с толщиной стенки 3 *мм* пакеты электродов соединяются с выводами. Оба вывода по конфигурации и размерам идентичны. Форма лезвия вывода определяется необходимостью предотвращения возникновения температурных напряжений опасной величины в спае стекла с металлом. Толщина стенки вывода в месте припайки его к стакану равна 1,5 *мм*.

На рис. 163 также указаны величины диаметра в рабочей части вывода. Для экранирования спая стекла с верхним выводом от высокочастотного поля величина диаметра нижнего основания взята равной величине верхнего основания.

Приведем расчет потерь в арматуре конденсатора.

Используя формулу (1-41), определяем емкости пар электродов для рабочей длины электродов 50,5 *мм*:

$C_1 = 20,0$; $C_2 = 23,7$; $C_3 = 27,2$; $C_4 = 31,1$; $C_5 = 34,8$; $C_6 = 38,7$; $C_7 = 42,6$; $C_8 = 46,1$; $C_9 = 50,0$; $C_{10} = 53,5$; $C_{11} = 57$; $C_{12} = 61,2$ *пф*.

Суммарная расчетная емкость при выбранной величине зазора, толщине электродов и рабочей длине $C = 485{,}9$ *пф* (при $C_{ном} = 500$ *пф*).

Учитывая, что реальная суммарная емкость всегда выше расчетной, оставляем выбранные и рассчитанные величины, определяющие геометрию пакетов электродов конденсатора.

Потери в электродах, образующих емкость конденсатора, определяются по формуле (6-15)

$$P_э = 2\frac{75^2 \cdot 0{,}0156 \cdot 55 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 11{,}4 \cdot 10^{-3} \cdot 500^2}\left[\frac{20^2}{3{,}21 \cdot 5} + \frac{20 \cdot 43{,}7}{25{,}5} + \frac{43{,}7 \cdot 70{,}9}{29{,}5} + \frac{70{,}9 \cdot 102}{33{,}5} + \frac{102 \cdot 136{,}8}{37{,}5} + \frac{136{,}8 \cdot 175{,}5}{41{,}5} + \frac{175{,}5 \cdot 218{,}1}{45{,}5} + \frac{218{,}1 \cdot 264{,}2}{49{,}5} + \frac{264{,}2 \cdot 314{,}2}{53{,}5} + \frac{314{,}2 \cdot 367{,}7}{57{,}5} + \frac{367{,}7 \cdot 425{,}2}{61{,}5} + \frac{425{,}2 \cdot 500}{65{,}5}\right] = 1{,}08 \cdot 10^{-3} \cdot 12\,670 = 13{,}7 \text{ вт}.$$

Потери во внешней поверхности наружного электрода определяем по формуле (6-16)

$$P_ц = \frac{75^2 \cdot 0{,}0156 \cdot 55 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 11{,}4 \cdot 10^3 \cdot 68} = 1{,}98 \text{ вт}.$$

Потери в основаниях определяем по формуле (6-17)

$$P_д = \frac{75^2 \cdot 0{,}0156 \cdot 10^{-3}}{2\pi \cdot 11{,}4 \cdot 10^{-3}} \ln\frac{68}{40} = 1{,}2 \text{ вт}.$$

Расчет потерь в стаканах и выводах (без учета торцовых поверхностей выводов) дает $P_{ст} + P_в = 7{,}3$ *вт*.

Суммарные потери в арматуре конденсатора $P = 24{,}3$ *вт*. Площадь наружной поверхности конденсатора (без учета торцовых поверхностей выводов) равна 390 *см*^{2}.

Приняв температуру перегрева конденсатора $\Delta t = 60°$ С, по формуле (1-118) определяем мощность теплоотвода

$$P_а = 10^{-3} \cdot 390 \cdot 60 = 23{,}4 \text{ вт}.$$

Таким образом, суммарные потери в конденсаторе приблизительно равны мощности теплоотвода. Выбранные и рассчитанные размеры конденсатора обеспечат его нормальную работу.

§ 30. КОНДЕНСАТОРЫ С ЖИДКИМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

В настоящее время конденсаторы с жидким диэлектриком применяются даже реже, чем газонаполненные, так как практически невозможно их использовать в современных стабильных радиоконтурах вследствие высоких значений ТКε. Применять конденсаторы с жидким диэлектри-

ком в контурах электротермических устройств, где не предъявляется высоких требований к стабильности емкости, имело смысл лишь в то время, когда такими конденсаторами заменяли дорогостоящие слюдяные конденсаторы. Некоторые зарубежные фирмы пошли по такому пути. Однако в настоящее время вместо слюды для этих целей используется высокочастотная керамика, поэтому применять жидкий диэлектрик уже нецелесообразно.

В связи с этим вопрос о расчете и конструировании конденсаторов с жидким диэлектриком подробно не рассматривается, а приводятся лишь некоторые общие соображения.

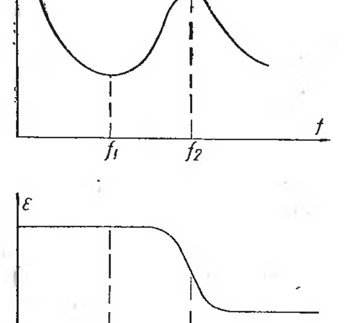


Рис. 164. Кривые зависимостей ε и tg δ жидкого полярного диэлектрика от частоты.

Обычная форма конденсатора при использовании жидкого диэлектрика — плоский многопластинчатый. После выбора зазора d такой конденсатор рассчитывается аналогично воздушным и газонаполненным конденсаторам с учетом того, что для жидкости $\varepsilon > 1$.

При использовании неполярных жидкостей типа нефтяного масла можно принимать $\varepsilon = 2{,}1 \div 2{,}2$, для касторового масла $\varepsilon \approx 4{,}5$, для хлорированных масс $\varepsilon = 4{,}5 \div 5{,}5$. За рубежом для таких конденсаторов применялся дибутил-себацинат (лектронол) с $\varepsilon = 4 \div 4{,}2$.

Полярные жидкости такого типа имеют резко увеличенные потери в сравнении с неполярными, однако при правильном выборе диапазона рабочей частоты они в принципе применимы для высокочастотных конденсаторов. С повышением частоты $\operatorname{tg}\delta$ полярной жидкости сначала снижается, проходит через минимум при частоте f_1 (рис. 164), а затем через максимум при частоте f_2; при этой частоте наблюдается заметное снижение ε. В области частот, примыкающей к f_1, можно получить малые потери при высокой ε. Так, для дибутил-себацината оптимальной областью частот является интервал от 10^5 до 10^6 *гц*, где сочетаются высокая ε и малый $\operatorname{tg}\delta$.

При выборе зазора надо учитывать, что реальные значения $E_р$ при высокой частоте должны быть резко снижены в сравнении с $E_{пр}$, которые указываются для жидкостей при использовании стандартного разрядника и частоте 50 *гц*.

Приходится считаться прежде всего с тем, что $E_{пр}$ жидкостей снижается с ростом частоты: при переходе от 50 *гц* к частоте порядка 10^5 — 10^6 *гц* снижение составляет около 30—35%. Далее надо учитывать зависимость $E_{пр}$ от площади обкладок: при площади 1000 *см*^{2} $E_{пр}$ снижается примерно на 35%, наконец, надо учесть старение жидкого органического диэлектрика при длительном воздействии электрического поля и повышенной температуры. Практически, в зависимости от тщательности сушки, очистки и обезгаживания жидкого диэлектрика, при частоте 0 — 0,1 *Мгц* принимают $E_р = 1 \div 2$ *кв/мм*, в среднем 1,3 — 1,5 *кв/мм*, т. е. значительно меньше, чем для сжатого газа. Таким образом, повышение ε дает выигрыш в размерах конденсатора только при сравнении с воздушным конденсатором.

Ограничение рабочего напряжения конденсатора с жидким диэлектриком в сравнении с газонаполненным конденсатором может быть обусловлено также увеличенными потерями в жидкости в сравнении с газом. Поэтому американские фирмы, выпускавшие высокочастотные конденсаторы с жидким диэлектриком, считали целесообразным изготовлять их с применением водяного охлаждения.

Проектирование конденсаторов с жидким диэлектриком осложняется также тем, что для защиты жидкости от увлажнения и действия пыли из окружающей атмосферы необходимо применять вакуумплотную герметизацию. Кроме того, необходимо учитывать термическое расширение жидкости, вызванное нагревом конденсатора от температуры окружающей среды до его рабочей температуры, после включения под напряжение. В связи с этим внутрь конденсатора приходится помещать расширитель (сильфон), или применять корпус с упругими стенками, которые деформируются и обеспечивают этим необходимое увеличение объема для расширения жидкого диэлектрика.

В современном конденсаторостроении жидкие диэлектрики применяются в основном в качестве вспомогательных материалов для пропитки или заливки конденсаторов с твердыми диэлектриками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богородицкий М. П., Рейнов Н. М., Черняев Ю. С., Образцовый газонаполненный конденсатор на напряжение 100 *кв*, «Электричество», 1956, № 1.

2. Гохберг Б. М., Рейнов Н. М., Гликина М. В., Высоковольтный конденсатор с газовой изоляцией под давлением, ЖТФ, 1942, XII, № 1.

3. Гохберг Б. М., Элегаз — электрическая газовая изоляция, «Электричество», 1947, № 3.

4. Гохберг Б. М. Газонаполненные конденсаторы, «Электричество», 1949, № 3.

5. Евтеев Ф. Е., Жуков В. А., Технология радиоаппаратуры, Госэнергоиздат, М. — Л., 1962.

6. Любимов М. Л., Спаи стекла с металлом, Госэнергоиздат, М.— Л., 1957.

7. Яськов Д. А., Эталонный высоковольтный конденсатор со сжатым газом на рабочее напряжение 250 *кв*, «Вестник электропромышленности», 1961, № 2.

8. Clark F. M., Scoville M. E., Capacitors for induction heating cirquits, «Electrical Engineering», 1945, vol. 64, № 11.

9. Curr W., Koenig I., Ein neuer Druck gas Kondensator für hohe Spannungen, «Elektric», 1964, 18, № 5.

10. Montgaillard J., Etude d'un condensateur variable sous vide, «L'onde électrique», 1961, 41, № 408.

6П2.1.08.
Р39

621.319.4

В книге рассмотрены расчет и конструирование основных типов конденсаторов постоянной емкости: бумажных низкого и высокого напряжения, пленочных, слюдяных, керамических, электролитических, вакуумных, газонаполненных и жидкостных.

Пособие предназначено для студентов политехнических и энергетических высших учебных заведений, специализирующихся в области электроизоляционной и кабельной техники. Пособие смогут также использовать студенты радиотехнических вузов, занимающиеся конструированием и расчетом радиоаппаратуры, а также студенты специальности «Физика диэлектриков и полупроводников». Кроме того, книга может быть полезной для работников конденсаторных заводов и конструкторских бюро, занимающихся разработкой конденсаторов, а также для инженеров других специальностей, связанных с изготовлением или применением конденсаторов.

$\frac{3\text{-}3\text{-}10}{518 - 66}$

Рецензенты *В. М. Файницкий*, канд. техн. наук, *М. И. Мантров*, доцент

Редакция литературы по энергетике, электронике, кибернетике и связи

Заведующий редакцией инж. *Р. П. Рак*

ХАРЬКОВСКАЯ КНИЖНАЯ ТИПОГРАФИЯ «КОММУНИСТ»